

Beitrag zur Kurzschlussstrombegrenzung mit leitfähigen Polymercompounds in der Niederspannungsebene

der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grads

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt von:	Dipl.-Ing. Alf Wabner
geboren am:	20.03. 1970 in Frankenberg
eingereicht am:	20.02. 2001
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Amft Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schufft Dr. rer. nat. Frank Richarz
Tag der Verteidigung:	16.08. 2001

Bibliographische Beschreibung

Verfasser:	Dipl.-Ing. Alf Wabner
Titel:	Beitrag zur Kurzschlussstrombegrenzung mit leitfähigen Polymercompounds in der Niederspannungsebene
Art der Arbeit:	Dissertation
Seiten:	151
Bilder:	123
Tabellen:	3
Anhänge:	18

Schlagwörter:

Strombegrenzung, leitfähige Polymere, Perkulationsnetzwerk, Leitfähigkeitsmechanismus, Selbstagglomeration, PTC-Effekt, NTC-Effekt, Kontaktmodell, Kontaktrauheiten, Kraftkontaktierung, Oberflächeneffekt, Elektrodenabhebung, Zersetzungsgas-Ruß-Gemisch

Referat:

Nach einer kurzen Einführung in das strombegrenzende Schalten folgen Betrachtungen über den Aufbau von thermoplastischen Polymeren, den Prozess der Sphärolithbildung sowie die Struktur der Ruße. Auf Grund der Füllstoffteilchenverdrängung im Verlauf der Sphärolithbildung sowie der Neigung der Füllstoffteilchen zur Agglomeration werden Überlegungen zur elektrischen Leitfähigkeit der Compounds angestellt. Gestützt auf den stark nichtlinearen Ausdehnungskoeffizienten der Thermoplaste und der Selbstagglomerationsneigung der Füllstoffteilchen erfolgt die Erklärung des Widerstandsverhaltens der Compoundmaterialien.

Die Optimierung des Compoundmaterials für Strombegrenzung erfolgt durch Untersuchung einer Auswahl von Parametern, die das Matrixmaterial, den Ruß sowie das Herstellungsverfahren betreffen.

Das Gesamtverhalten eines polymeren Strombegrenzers lässt sich nicht allein mit dem Widerstandsverhalten des Compounds erklären. Deshalb werden die Gegebenheiten im Bereich des Metall-Compound-Kontakts untersucht. Mit der so gewonnenen Modellvorstellung und dem Verständnis der Funktionsweise des Compounds ist es dann möglich das Gesamtverhalten zu beschreiben. Dabei ist zwischen oberflächennahem-PTC-Effekt und Volumen-PTC-Effekt sowie dem Oberflächeneffekt zu unterscheiden. Durch einen Alternativansatz können bisherige Diskrepanzen bezüglich der Erklärung der Phänomene beim Oberflächeneffekt ausgeräumt werden. Es erfolgt eine Gegenüberstellung von PTC- und Oberflächeneffekt hinsichtlich ihres Anteils am Gesamtverhalten.

Abschließend werden Aspekte zur Dimensionierung eines polymeren Strombegrenzers behandelt.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
Vorwort	8
1 Einleitung	9
2 Erwartungen, Zielstellung der Arbeit, Vorgehensweise	12
3 Funktion und Aufbau von leitfähigen Polymercompounds	14
3.1 Leitfähige Polymercompounds	14
3.2 Anwendungsgebiete leitfähiger Polymercompounds	14
3.3 Struktureller Aufbau der Thermoplaste	16
3.4 Prozess der Sphärolithbildung	17
3.5 Struktureller Aufbau der Ruße	18
3.6 Perkulationsnetzwerk	19
3.7 Leitfähigkeitsmechanismen	20
3.8 Verteilung der Füllstoffteilchen in der Matrix / Perkulationsschwelle	20
3.8.1 Stochastische Verteilung	20
3.8.2 Ungleichmäßige Verteilung	21
3.9 Temperaturkoeffizient des Widerstands	24
3.10 NTC-Effekt	26
4 Compoundoptimierung für die Strombegrenzung	29
4.1 Zielfunktionsdefinition	29
4.2 Einflussfaktoren auf die Eigenschaften additiv ausgerüsteter Polymercompounds	30
4.2.1 Einflüsse bedingt durch das Matrixmaterial	30
4.2.2 Einflüsse bedingt durch den Füllstoff	33
4.2.3 Einflüsse bedingt durch das Herstellungsverfahren	36
4.3 Schlussfolgerungen	38
5 Elektrische Kontaktierung	40
5.1 Elektrischer Kontakt	40
5.1.1 Metall-Metall-Kontakt	40
5.1.2 Metall-Compound-Kontakt	41
5.2 Abschätzung der wahren Berührungsfläche	42
5.3 Mikroskopische Kontaktrauheiten, makroskopische Kontaktunebenheiten	43
5.4 Auswirkungen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Kontaktmaterialien	45

5.5 Forderungen an den Metall-Compound-Kontakt	49
5.6 Kraftkontaktierung	50
5.7 Beschreibung des Kontaktsystems	51
5.7.1 Makroskopisches Kontaktmodell	52
5.7.2 Mikroskopisches Kontaktmodell	54
5.8 Bewertung der Kontaktierung durch den Gütefaktor	58
6 Funktionsweise des kontaktierten Compounds bei Hochstrombelastung	60
6.1 Gebräuchliche Erklärungsansätze zur Strombegrenzung	60
6.2 Offene Fragen / Unzulänglichkeiten	61
6.2.1 Zur Rolle des PTC-Effekts	62
6.2.2 Oberflächeneffekt und Strombegrenzung	63
6.2.3 Oberflächeneffekt und Kontaktöffnung	64
6.2.4 Stromübergang bei abgehobener Elektrode	64
6.3 Darstellung des Verhaltens von polymeren Strombegrenzern bei Hochstrombelastung	64
6.4 Weiterentwickelter Ansatz zur Erklärung der Strombegrenzung	67
6.4.1 Wirkungen im Volumen	68
6.4.2 Wirkungen in der oberflächennahen Schicht des Volumens	70
6.4.3 Wirkungen an der Grenzfläche Compound - Elektrode	71
6.4.3.1 Kontaktkraft, Elektrodenabhebung, Widerstandsanstieg	71
6.4.3.2 Ursache der Elektrodenabhebung	72
6.4.3.3 Wirkmechanismus	72
6.4.3.4 PTC-Anteil am Gesamtwiderstandsanstieg	74
6.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Widerstandsverhalten	77
6.6 Wichtung der den einzelnen Wirkungen zuordenbaren Widerstandsanstiege	79
6.7 Spezielle Untersuchungen zum Stromübergang zwischen Compound und Elektrode beim Oberflächeneffekt	81
6.7.1 Indizien und Beschreibung der Phänomene	81
6.7.2 Untersuchung der Leitfähigkeit der ausgestoßenen Gase	83
6.7.3 Spezielle Untersuchung der Stromleitung in einem Ruß-Zersetzungsgas-Gemisch	85
6.7.3.1 Arbeitshypothese	85
6.7.3.2 Ruß-Zersetzungsgas-Gemisch als Medium	86
6.7.3.3 Ergänzende Abschätzungen aus Abbrandversuchen	86
7 Anwendungen	89

7.1 Aspekte der Dimensionierung	89
7.2 Schaltungsvarianten	92
7.3 Grenzleistung, Überspannungen	95
8 Zusammenfassung und Ausblick	97
 Literaturverzeichnis	 102
 Anhang 1: Kristallisationsbegünstigende Struktureinflüsse der Kunststoffe	 105
Anhang 2: Versuchsaapparatur zur Bestimmung von $R(T)$	106
Anhang 3: Utensilien zur Compoundherstellung	107
Anhang 4: Vier-Punkt-Messung zur Leitfähigkeitsbestimmung	109
Anhang 5: Leitfähigkeitsbestimmung von Ruß in Abhängigkeit des Drucks	110
Anhang 6: Kraftkontaktierung	111
Anhang 7-1: Modellierung eines Rußteilchens	112
Anhang 7-2: Bestimmung der Kristallinität von HDPE + 40 % Ruß	114
Anhang 7-3: Abschätzung der Sphärolithgröße von HDPE	116
Anhang 7-4: Beschreibung der Randzone teilkristalliner Kunststoffe	117
Anhang 7-5: Kristallinität der Randzone	119
Anhang 8: Versuchsaufbau für Hochstromuntersuchungen	120
Anhang 9: Simulationsmodell für den PTC-Effekt bei Hochstrombelastung	122
Anhang 10: Phasenverschiebung zwischen Kraft und Widerstand	124
Anhang 11: Hochgeschwindigkeitsvideoaufzeichnungen	129
Anhang 12: Versuchsaufbau zur Leitfähigkeitsbestimmung der ausgestoßenen Gase	132
Anhang 13: Bestimmung der Leitfähigkeit von Ruß in Petroleum bzw. Silikonöl	134
Anhang 14: Simulationsmodell für die Stromtragfähigkeit eines polymeren Strombegrenzers	135
 Verzeichnis der Bilder und Tabellen	 138
Selbstständigkeitserklärung	143
Thesen	144
Lebenslauf	151

Abkürzungsverzeichnis

A_T	..	wahre Berührungsfläche
A_S	..	scheinbare Kontaktfläche
b	..	Breite
c	..	spez. Wärmekapazität
d	..	Dicke
D	..	Dichte
f	..	Frequenz
F	..	Kraft
F_K	..	Kontaktkraft
H_B	..	Brinellhärte
H_V	..	Vickershärte
I	..	Strom
I_{PROS_MAX}	..	Spitzenwert des prospektiven Stroms in der ersten Halbwelle nach Fehlereintritt
l	..	Länge
L	..	Induktivität
m	..	Masse
$Mas\%$..	Masse-Prozente
p	..	Druck
P	..	Leistung
PE	..	Polyethylen
Q	..	Gütefaktor
R	..	Widerstand
R_{BP}	..	Bypasswiderstand
S	..	Sprunghöhe (Widerstandsanstieg im Sprungbereich)
S_{DURCH}	..	Widerstandsanstieg im Durchgangsbereich
S_{SPERR}	..	Widerstandsanstieg im Sperrbereich
t	..	Zeit
T	..	Temperatur
T_S	..	Schmelztemperatur
U	..	Spannung
\hat{U}	..	Spitzenwert der Spannung
v	..	Geschwindigkeit

V	..	Volumen
Vol%	..	Volumenprozente
W	..	Arbeit
x	..	Weg, Abhebehöhe
Δt	..	Zeitschrittweite
Δx	..	Schrittweite des Orts
α	..	Wärmeübergangskoeffizient
α_L	..	Längenausdehnungskoeffizient
δ	..	Boltzmannkonstante
ε	..	Emissionskoeffizient
ϕ_E	..	Einschaltwinkel
λ	..	Wärmeleitfähigkeit
ρ	..	spez. Widerstand
ρ_0	..	spez. Kaltwiderstand
ρ_T	..	wahrer spez. Widerstand

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Ergebnis meiner fünfjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Energie- und Hochspannungstechnik der Technischen Universität Chemnitz. Die Arbeit wurde zeitweilig durch ein Stipendium des Freistaats Sachsen unterstützt.

Meinem Mentor und früherem Leiter der Professur, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. D. Amft gilt besonderer Dank für die kontinuierliche Förderung und Unterstützung, die zahlreichen Hinweise, Anmerkungen und kritischen Diskussionen, die wesentlich zur Entstehung der Arbeit beigetragen haben.

Außerdem danke ich Frau Dipl.-Ing. P. Heitmann, Herrn Dipl.-Ing. H. Wehling, Herrn Dipl.-Ing. F. Wachholz und Herrn Dipl.-Ing. D. Werner für nützliche Diskussionen und allen Mitarbeitern der Professur für ihre Hilfsbereitschaft. In diesem Zusammenhang möchte ich Herren Dipl.-Ing. D. Breitfeld und M. Stark besonders erwähnen, die durch ihre Kenntnis des Versuchsfelds bzw. spezieller Verfahren zum guten Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt den Herren Dr.-Ing. F. Richarz und T. Hindert der Firma Moeller GmbH Bonn. Der steten und guten Zusammenarbeit ist in nicht unerheblichen Maße der Erfolg meiner Arbeit zu verdanken. In diesem Rahmen war es mir möglich, Versuchen im Prüflaboratorium Bonn beizuwohnen und bei diesen mitzuwirken. In bedeutendem Umfang wurden mir Versuchsergebnisse sowie Ausgangsmaterial für weitere Versuche zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus bin ich den Mitarbeitern der Firma Moeller GmbH für die ausführlichen und konstruktiven Diskussionen sowie die hieraus resultierenden Anregungen sehr verbunden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Schufft danke ich für die Übernahme eines Gutachtens und richtungsweisender Hinweise.

1 Einleitung

Bedingt durch den Anstieg des Bedarfs an Elektroenergie kam und kommt es zu einem kontinuierlichen Ausbau des Energieversorgungsnetzes. Gekennzeichnet ist der Ausbau von einer engeren Vermaschung und einem Anstieg der Anschlusswerte. Die Folge ist, dass es zu einer ständigen Erhöhung der Ströme im Falle eines Kurzschlusses kommt. Um die dann auftretenden thermischen und elektrodynamischen Beanspruchungen beherrschen zu können, wurde es im geschichtlichen Rückblick zunehmend erforderlich die Anlagen über das für den Nennstrom erforderliche Maß hinaus überzudimensionieren. Diese raum- und kostenintensiven Maßnahmen kamen recht bald in Konflikt mit den Wünschen und Vorstellungen der Praxis. Die Lösung dieses Problems wird durch eine Begrenzung des im Kurzschlussfall fließenden Stroms erreicht. Mittels geeigneter Maßnahmen wirkt man dabei reduzierend auf den Strom ein, noch bevor dieser seinen prospektiven Wert erreicht. Viele Niederspannungsschalter schalten dem heutigen Stand der Technik nach strombegrenzend durch Lichtbogenbeeinflussung (Gleichspannungs-Löschprinzip). In der Mittel- und Hochspannung liegt der Schwerpunkt bei der sicheren Schaltlichtbogenlöschung im Stromnulldurchgang. In diesem Fall spricht man von Nullpunktlöschern. Strombegrenzendes Schalten in diesen Spannungsebenen ist eher unüblich. Hier werden Möglichkeiten der Netzauftrennung genutzt und Schalter so dimensioniert, dass sie den Beanspruchungen im Fehlerfall für einen gewissen Zeitraum standhalten können. Den an einen strombegrenzenden Schalter gestellten Forderungen können Funktionsbausteine gemäß Abb. 1 zugeordnet werden:

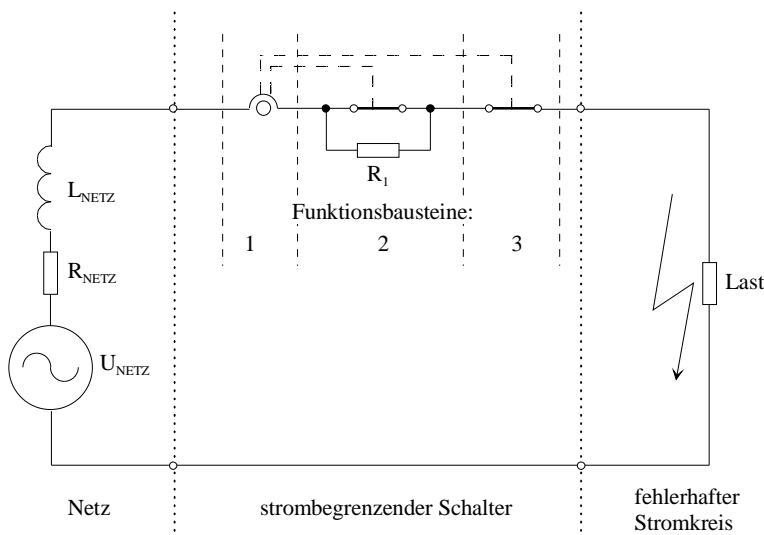


Abb. 1: Funktionsbausteine eines strombegrenzend wirkenden Schalters

1. Rasche Erkennung der Kurzschlussituation, erzeugen eines Handlung-/Steuersignals
2. Geringer Zeitverzug, Erhöhung des Bahnwiderstands zur Begrenzung eines prospektiven

Kurzschlussstromes, angestrebte Schaltüberspannung: 1,5 ... 2,5fachem der treibenden Spannung

3. Galvanische Trennung

Bei mehreren in Reihe geschalteten Schaltern ist es im Zuge der Selektivität erforderlich, dass das Ansprechen eines Schalters (Funktion 1 und 2) nicht automatisch von der Funktion 3, der kompletten Abschaltung des Stromkreises, begleitet wird.

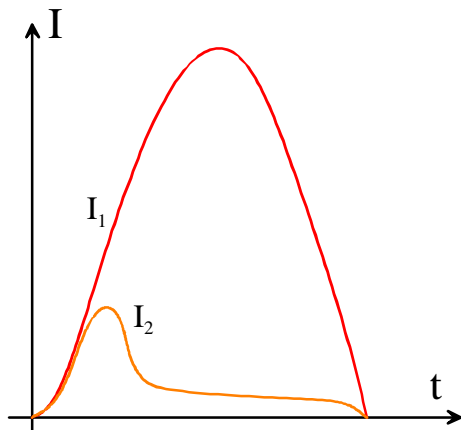


Abb. 2: Wirkung eines strombegrenzenden Schalters

Durch einen strombegrenzend wirkenden Schalter wird der prospektive Kurzschlussstrom ($I_1(t)$) auf einen kleineren Wert ($I_2(t)$) verringert (Abb. 2). Dabei sollte die Strombegrenzung noch bevor der Strom im unbeeinflussten Fall seinen Scheitelwert erreicht hat wirksam werden, was nur bei möglichst geringer Zeitverzögerung (≤ 1 ms) erreichbar ist.

Das heute am häufigsten eingesetzte Wirkprinzip zur Strombegrenzung beruht auf dem Spannungsaufbau mittels eines Lichtbogens. Im Normalfall fließt dabei der

Strom über eine Bahn, welche ein geschlossenes Kontaktstückpaar enthält. Im Fehlerfall wird dieses aufgetrennt und es kommt zur Entstehung eines Lichtbogens. Der Spannungsbedarf eines Lichtbogens setzt sich aus Anoden- und Kathodenfall sowie dem Spannungsabfall über der Lichtbogensäule zusammen. Um den Spannungsbedarf (und damit die vom Schalter erzeugte Schaltüberspannung) in die gewünschte Region von 1,5 ... 2,5* U_{NETZ} zu bekommen, sind am zwischen den Kontaktstücken frei brennenden Bogen spannungssteigernde Maßnahmen vorzunehmen. Um den Spannungsbedarf zu erhöhen, wird z.B.:

- der Lichtbogen mittels divergierender Laufschienen aufgeweitet,
- der Lichtbogen mittels geeigneter Umgebungsmedien gekühlt (Flüssigkeiten, strömende Gase, enge Spalten, gasende Wandmaterialien) oder
- der Lichtbogen in mehrere Teillichtbögen aufgeteilt (Löschblechpakete).

Darüber hinaus existiert eine Reihe weiterer Möglichkeiten zur Strombegrenzung. Ihre Verwendung ist in der Gegenwart meist nicht mehr üblich bzw. beschränkt sich auf Spezialanwendungen, beispielsweise:

- Elektronische Schalter (Hybridschalter): Sie bestehen z.B. aus antiparallel geschalteten Thyristoren, die im Fehlerfall durch eine Gegenstromentladung zwangsgelöscht werden.
- Verwendung von Induktivitäten (speziell Permeabilitäts- bzw. Flussbeeinflussung)

- Verwendung von Sprengkapseln: Auftrennen der Hauptstrombahn und Schaltlichtbogenlöschung durch Blasung mittels chemischer Treibladung, Kommutieren des Stroms auf höherohmschen Parallelzweig
- Flüssigmetallschalter

Ein Überblick zum Thema Schaltgeräte und strombegrenzendes Schalten ist in [1] und [2] zu finden.

Das Strombegrenzen mit leitfähigem Polymercompound wurde 1994 von der Firma ABB unter dem Namen PROLIM auf dem Markt eingeführt [44]. Der PROLIM-Widerstand wird in Reihe mit einem Leitungsschutzschalter betrieben und dient diesem zur Schaltleistungsertüchtigung. Dabei sind die Funktionsbausteine 1 und 2 durch die Materialfunktion integriert.

2 Erwartungen, Zielstellung der Arbeit, Vorgehensweise

Der Leistungsbereich bis 63 A wird in der 230 V - und 400 V - Ebene von Leitungsschutz- bzw. Motorschutzschaltern beherrscht. Das Kurzschlussschaltvermögen der Leitungsschutzschalter beträgt typisch 6 kA das der Motorschutzschalter 30 kA. Dies ist für die meisten Anwendungsfälle ausreichend. Der Einsatz dieser Schalter in höheren Spannungsebenen ist, wenn überhaupt, nur mit einer erheblichen Einbuße an Kurzschlussschaltvermögen möglich. So verbleiben bei einem Motorschutzschalter mit einem Schaltvermögen von 30 kA bei 400 V nur noch 5 kA bei 690 V. Der Grund dafür liegt in der Verwendung von Löschblechpaketen zur primären Lichtbogenspannungserhöhung. Da die Anzahl der Bleche begrenzt und der Spannungsabfall pro Teillichtbogen eine nahezu fixe Größe ist, kann die Schaltüberspannung dieser Schalter nicht beliebig vergrößert werden. Der Verwendung von Blasspulen oder einer größeren Lichtbogenaufweitung stehen die kompakte Bauform und die Kosten entgegen. Somit könnte es zur Schalteistungsertüchtigung sowie bei der neuerdings angedachten 1200 V - Ebene erforderlich werden, andersartige Prinzipien bei der Strombegrenzung zu verwirklichen.

Ein Ansatz auf diesem Weg könnte der von ABB mit dem PROLIM beschrittene Weg [44] darstellen. Das aktive Bauteil des PROLIM ist ein leitfähiges Kunststoffplättchen über dessen Funktion nur unvollständige Angaben existieren. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, das Verständnis der Wirkungsweise von Strombegrenzern auf der Basis von Polymercompounds zu verbessern und somit einen Beitrag für die Konstruktion neuer, leistungsfähigerer, strombegrenzender Schalter zu liefern.

In der Literatur werden Widerstände auf der Basis leitfähiger Polymercompounds häufig auch als PTC-Widerstände bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird dieser Terminus nicht verwendet, da diese Bezeichnung unter anderem auch keramische Materialien [20] oder bestimmte Metalllegierungen [23] mit einschließen würde. Die prinzipielle Anwendbarkeit derartiger Materialien zur Strombegrenzung wurde schon teilweise nachgewiesen. Dem gegenüber befasst sich die vorliegende Arbeit ausschließlich mit Materialien die aus:

- einer nichtleitfähigen Phase - einer Kunststoffmatrix (z.B. einem Thermoplast) und
- einer leitfähigen Phase - einem Füllstoff (z.B. Ruß) bestehen.

Der Betrachtungsgegenstand wird durch die Beschränkung auf Materialien bei denen die Widerstandserhöhung ihre Ursache in der Erwärmung hat, weiter eingeeengt. Nicht betrachtet werden Materialien deren Widerstandserhöhung auf dem Einfluss des elektrischen Felds [25] oder des Pinch-Effekts [26] beruhen.

Zuerst werden Betrachtungen über den Aufbau der Thermoplaste, den Prozess der

Sphärolithbildung sowie die Struktur der Ruße durchgeführt. Auf der Grundlage der Füllstoffteilchenverdrängung in Folge der Sphärolithbildung sowie der Neigung der Füllstoffteilchen zur Agglomeration erfolgen Überlegungen zum Zustandekommen der elektrischen Leitfähigkeit der Compounds. Darauf aufbauend soll mit Hilfe der Temperaturabhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur mit den charakteristischen PTC- und NTC-Kennlinienabschnitten erklärt werden. Zur Auswahl eines für die Strombegrenzung sinnvollen Compoundmaterials wird eine Zielfunktion formuliert. Die Compoundoptimierung erfolgt durch die Variation einer Auswahl von Parametern, die das Matrixmaterial, den Füllstoff und das Herstellungsverfahren betreffen. Da das Verhalten eines polymeren Strombegrenzers nicht hinreichend mit dem dem Compoundmaterial zuordenbaren PTC-Effekt erklärt werden kann, soll anschließend ein spezifisches Kontaktmodell für die Grenzschicht Metall-Compound entwickelt werden. Mit dem so gewonnenen Verständnis des Metall-Compound-Kontakts und der Kenntnis der Funktionalität des Compounds selber soll das Verhalten eines polymeren Strombegrenzers beschrieben werden. In diesem Zusammenhang wird das Compound unter entsprechenden Randbedingungen elektrischen Belastungen ausgesetzt, die helfen sollen folgende grundlegende Fragestellungen zu beantworten:

- Kommt es zu einem Abheben der Elektroden vom Compound ?
- Was ist die Ursache für dieses Abheben ?
- Wie erfolgt der Stromübergang zwischen abgehobener Elektrode und Compound ?
- Wie hoch ist der Anteil des PTC-Effekts am Gesamtverhalten ?
- Wodurch wird die Höhe dieses Anteils beeinflusst ?
- Ist die Intensität des PTC-Effekts im dynamischen Betriebsfall mit dem quasistatischen Messergebnis vergleichbar ?

Abschließend sollen im Hinblick auf die Verwendung von polymeren Strombegrenzern bei der Konstruktion neuartiger Schalter, einige Aspekte zur praktischen Dimensionierung betrachtet werden.

3 Funktion und Aufbau von leitfähigen Polymercompounds

3.1 Leitfähige Polymercompounds

Wie schon im Abschnitt 2 angedeutet, wird nachfolgend unter leitfähigen Polymercompounds ein Gemisch aus einer nichtleitfähigen und einer leitfähigen Phase verstanden. Die nicht leitfähige Phase wird durch ein Kunststoffmaterial repräsentiert. Vordergründig handelt es sich dabei um ein teilkristallines, thermoplastisches Polymer. Ebenfalls können amorphe, duroplastische oder elastische Kunststoffmaterialien Verwendung finden. Bei der leitfähigen Phase handelt es sich vordergründig um Ruß. Es können jedoch auch Metallpulver oder andere Kohlenstoffmaterialien wie z.B. Graphit zum Einsatz kommen. Für die vorliegende Arbeit ist es dabei unerheblich, ob die einzelnen Phasen im strengen Sinn des Worts aus einem Material oder einer Kombination von Materialien bestehen.

3.2 Anwendungsgebiete leitfähiger Polymercompounds

Die Entwicklung neuer Kunststoffmaterialien ermöglichte ein zunehmend breiter werdendes Anwendungsspektrum dieser Materialien. Nicht immer wurde dabei das im allgemeinen hohe Isolationsvermögen der Kunststoffe als vorteilhaft empfunden. Somit stand bei der Entwicklung leitfähiger Polymercompounds nicht die Verwendung zur Strombegrenzung im Vordergrund, vielmehr ging es um die antistatische Ausrüstung zur Vermeidung elektrischer Aufladung. Im Zuge dieser Entwicklung stieß man auf eine Reihe von weiteren Verwendungsmöglichkeiten. Einen Überblick darüber erhält man in [8] und [19].

In der Flugzeug- und Fahrzeugindustrie führte in erster Linie der Wunsch nach Gewichtsreduzierung zum vermehrten Einsatz von Kunststoffen. Diese Materialien müssen antistatisches Verhalten aufweisen, um elektrostatische Aufladung beispielsweise durch Luftreibung zu unterbinden. Bei der Verwendung für Kraftstofftanks bzw. zur Aufbewahrung von Stäuben und Pulvern ist es im Sinne des Explosionsschutzes notwendig elektrostatische Aufladung zu vermeiden. In der Halbleiterindustrie müssen zur Vermeidung einer Beschädigung der Bauelemente Fußbodenbeläge, Verpackungen und dergleichen antistatisch ausgerüstet werden.

Als nahezu verschleißfreie Kontaktmaterialien für Schalter und Taster im μA - und mA -Bereich besitzen leitfähige Polymercompounds heute eine dominierende Stellung. Zur Anwendung kommen diese hauptsächlich in der Elektronik in Form verschiedenster Tastaturen.

In der Messtechnik finden taktile Sensoren auf Basis leitfähiger Polymercompounds zur Druckermittlung Verwendung. Genutzt wird hier eine spezifische Form der leitfähigen

Polymercompounds, bei denen der Widerstand eine Abhängigkeit vom Druck aufweist.

Die Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlung (EMV) stellt eine weitere Anwendungsmöglichkeit der leitfähigen Polymercompounds dar. Die Verwendung dieser Materialien als Gehäusewerkstoffe bei elektronischen Geräten schützt die Geräte sowie die Umwelt vor elektromagnetischer Strahlung.

Die Kenntnis der stark nichtlinearen Abhängigkeit des Compoundwiderstands von der Temperatur (PTC-Effekt) - insbesondere bei Verwendung von thermoplastischen Matrixmaterialien - sowie die mittels Vernetzung erreichbare Verbesserung der Materialeigenschaften ([24] und [35]) haben neben der Verwendung in der Strombegrenzung einige weitere Anwendungsgebiete erschlossen. So stellt die Verwendung von leitfähigen Polymercompounds als selbstregelnde Heizbänder für Rohrbegleit-, Behälter- oder Dachrinnenheizungen unter Sicherheits- wie auch Kostenaspekten eine überaus interessante Lösung dar. Die Verwendung zur Feldsteuerung in Mittel- und Hochspannungskabeln, Kabelendverschlüssen sowie Muffen hat eine dominierende Stellung erreicht. Hier stellte der Übergang von unvernetztem PE zu vernetzten XPE einen bedeutsamen Durchbruch dar. Eine weitere Anwendung ist die Verwendung als Anoden für den kathodischen Korrosionsschutz. Hier kann der Einsatz von vernetzten Compounds wegen seiner sehr geringen Quellneigung unter aggressiven Umgebungsbedingungen einen entscheidenden Beitrag zu Kostenreduktion durch Substitution von Edelmetallen wie z.B. Platin leisten.

3.3 Struktureller Aufbau der Thermoplaste

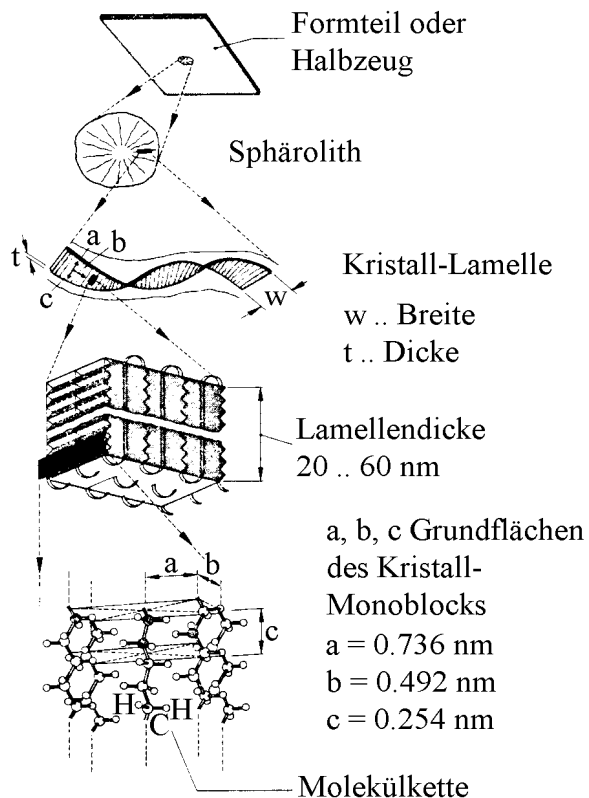


Abb. 3: Struktureller Aufbau von Polyethylen (nach [38])

Katalysatoren bei der Herstellung - beträchtliche Größen und Molekulargewichte ($>10^6$ g/mol) erreichen. Ausgangsstoff des in dieser Arbeit hauptsächlich betrachteten Kunststoffes Polyethylen ist das Ethen (C_2H_4). Durch die Aufspaltung der Doppelbindung dieser Verbindung und dem Aneinanderreihen einer Vielzahl der somit entstandenen Radikale entsteht das Makromolekül

Neben rein amorphen Kunststoffen existieren Kunststoffe deren Moleküle im festen Aggregatzustand in der Lage sind, sich zumindest partiell in einem gewissen Ordnungszustand anzuordnen. Die sich so bildenden kristallinen Zonen im Kunststoff werden als Sphärolithe bezeichnet (Abb. 3). Ein Sphärolith besteht aus einer Vielzahl von Lamellen die um ein Zentrum - den Kristallkeim - angeordnet sind. Die Kristalllamellen sind die eigentlichen kristallinen Zonen. In diesen sind die Moleküle mäanderförmig angeordnet. Die Makromoleküle können - in Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen und den verwendeten

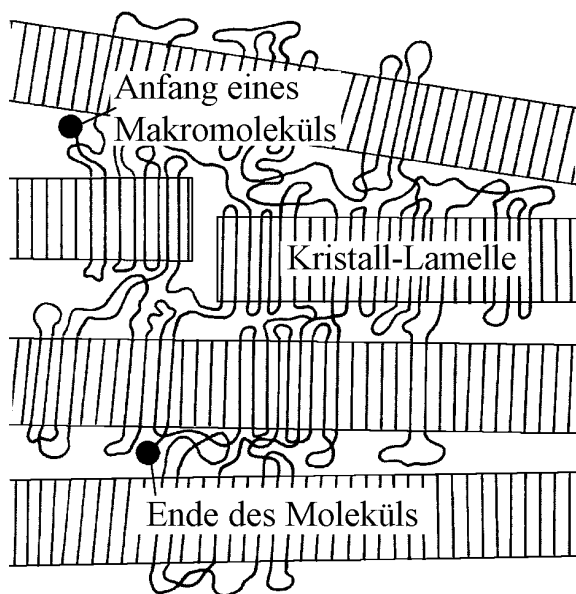


Abb. 4: Lage eines Einzelmakromoleküls im lamellaren Verbund (nach [9])

Polyethylen.

Obwohl die Größe eines Moleküls zur Bildung einer Lamelle ausreichend wäre, besteht eine Lamelle immer aus einer Vielzahl von Molekülen (Abb. 4). Im Gegenzug ist ein Molekül dann auch an mehreren Lamellen beteiligt. Übrig bleiben die Bereiche zwischen den Lamellen, in denen die Moleküle von einer Lamelle in die nächste übergehen.

Die Moleküle liegen bei der Herstellung zunächst ungeordnet vor und ordnen sich bei der Abkühlung regelmäßig im Bereich der Lamellen

an. Unabhängig von der Kunststoffsorte verbleiben in den Zwischenräumen im Gegensatz zu den Metallen immer amorphe Bereiche. Ursächlich für dieses Phänomen ist die Größe der Moleküle. So wird es mit der Zunahme des Anteils eines Makromoleküls, welcher bereits im Zuge der Rekristallisation einen Ordnungszustand eingegangen ist, für den restlichen Anteil immer schwerer einen eben solchen einzugehen. Selbst nach unendlich langer Temperung wird ein amorpher Rest übrigbleiben.

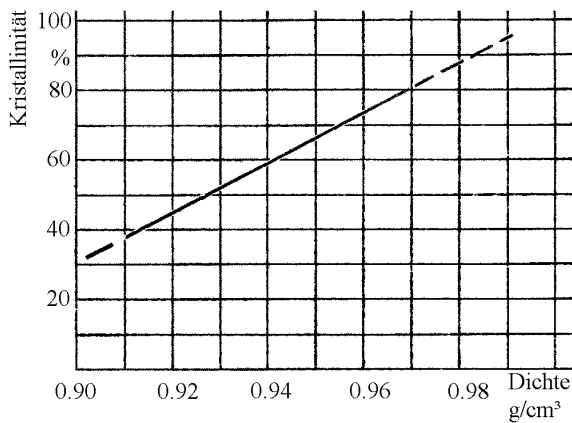


Abb. 5: Zusammenhang zwischen Dichte und Kristallinität von PE (nach [9])

Im Fall des Polyethylens beträgt die Dichte in den kristallinen Bereichen 1.0 g/cm^3 in den amorphen hingegen nur 0.86 g/cm^3 . Die Dichte von realem teilkristallinen PE ergibt sich aus dem Verhältnis vom amorphen zum kristallinen Anteil (Abb. 5). Im Fall von Polyethylen sind Marken mit einer Kristallinität zwischen 30 ... 80 % handelsüblich.

Die Kristallinität der Kunststoffe wird hauptsächlich durch die Molekularstruktur und die Verarbeitungsbedingungen bestimmt. Im Allgemeinen sind Werte zwischen 5 ... 95 Vol% [3] zu beobachten. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Molekularstruktur sind im Anhang 1 zusammengefasst. Die Haupteinflussfaktoren des Verarbeitungsprozesses sind die Verarbeitungsdauer und -temperatur. Langes Tempern unterhalb der Schmelzgrenze erhöht den kristallinen Anteil, demgegenüber vergrößert plötzliches Abschrecken den amorphen Anteil.

3.4 Prozess der Sphärolithbildung

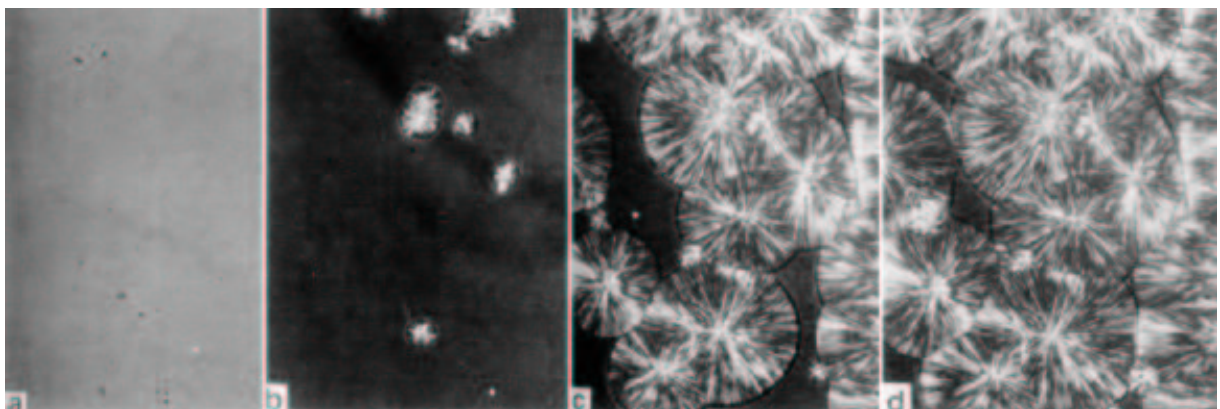


Abb. 6: Sphärolithwachstum in der amorphen Schmelze (nach [38])

$t_1 = 0$

$t_2 > t_1$

$t_3 > t_2$

$t_4 > t_3$

In der amorphen Schmelze des Kunststoffs liegen die Makromoleküle ungeordnet zueinander vor.

Kühlt man die Schmelze bis in den Erstarrungstemperaturbereich ab, fangen die Makromoleküle an, sich beginnend von einem Kristallisationskeim (z.B. Talkum- oder Rußpartikel) mäanderförmig um diesen anzulagern (Abb. 7). Die sich so bildenden Kristalle werden ihrer kugelförmigen Gestalt wegen, als Sphärolithe bezeichnet. Wird die Temperatur recht schnell weit unter den Erstarrungstemperaturbereich abgesenkt, verbleibt ein vergleichsweise großer Anteil des Kunststoffs auch im erstarrten Zustand amorph. Der Vorgang des Sphärolithwachstums wird somit beim Zeitpunkt t_2 oder t_3 eingefroren (Abb. 6).

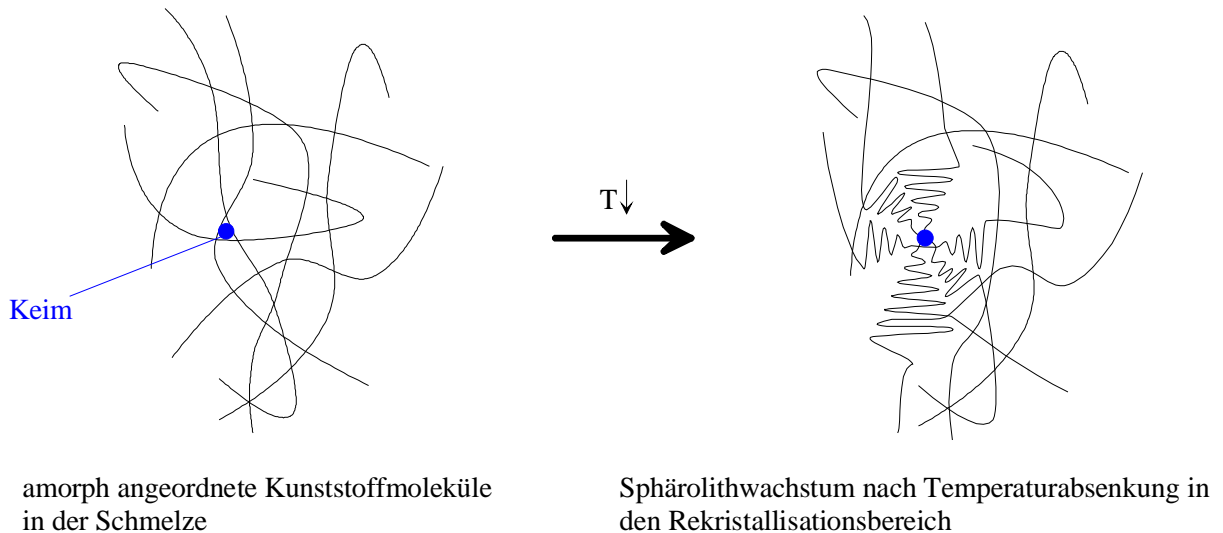


Abb. 7: Prozess der Sphärolithbildung (schematisch)

3.5 Struktureller Aufbau der Ruße

Die innere Struktur der Rußteilchen wird als parakristall [11] (vergleichbar mit dem Terminus

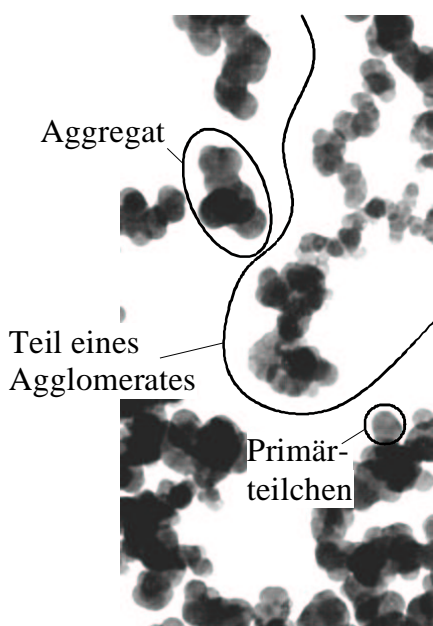


Abb. 8: Gestalt der Rußteilchen (nach [11])

teilkristallin bei Polymeren) bezeichnet. In Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren besteht Ruß fast ausschließlich aus Kohlenstoff (> 95 %). Ruß besitzt analog dem Graphit ein hexagonales Gitter, welches in übereinander liegenden Schichten angeordnet ist. Wegen des raschen Wachstums beim Herstellungsprozess von Ruß kommt es jedoch nicht zur Ausbildung eines exakten Gitters. Die einzelnen Schichtebenen sind gekrümmt und weisen Knickstellen auf. Sie erstrecken sich über mehrere Primärteilchen hinweg und bilden zwischen diesen eine direkte elektrische Verbindung.

Die Primärteilchen des Rußes besitzen eine kugelförmige

Gestalt. Unter realen Bedingungen sind immer mehrere solcher Primärteilchen miteinander verwachsen (Abb. 8). Man bezeichnet diese Gebilde als Rußaggregate. Sie neigen dazu sich zu noch größeren Partikelgruppen zusammenzufinden, welche als Agglomerate bezeichnet werden. Bei den für die leitfähige Ausrüstung von Kunststoffen verwendeten Rußen handelt es sich um spezielle Leitfähigkeitsruße. Diese besitzen recht kleine Primärteilchen (ca. 30 ... 50 nm), eine große spezifische Oberfläche (Größenordnung $> 100 \text{ m}^2/\text{g}$) sowie einen geringen Gehalt an Oberflächenoxiden (Kohlenstoffgehalt $> 99,5 \%$).

3.6 Perkulationsnetzwerk

Die dreidimensionale Anordnung der Füllstoffteilchen in einem Zweikomponentensystem bestehend aus einer Matrix- und einer Füllstoffkomponente wird als Perkulationsnetzwerk bezeichnet. Abhängig von der Form und der Verteilung der Füllstoffteilchen existiert eine bestimmte Füllstoffkonzentration, ab welcher ein geschlossener Pfad bestehend aus Füllstoffteilchen durch das System zu Stande kommt (Abb. 9).

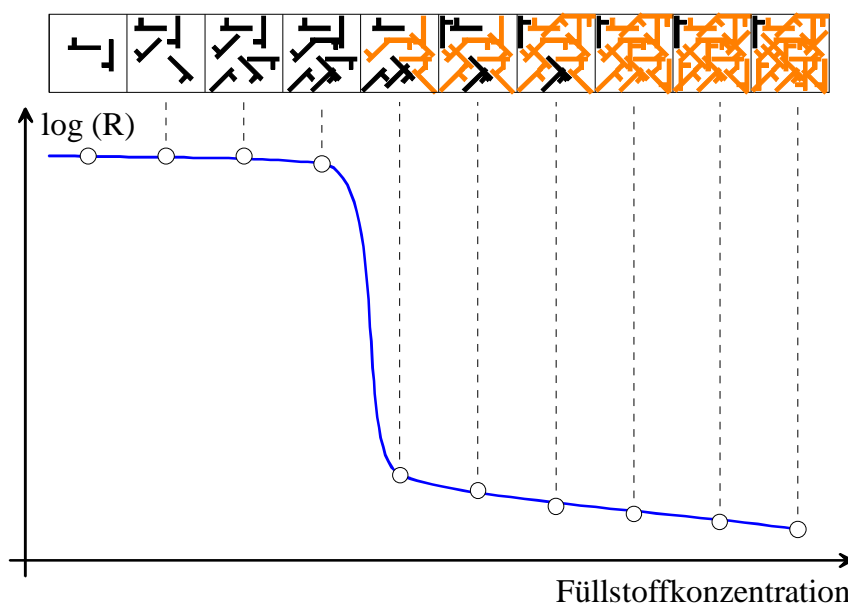


Abb. 9: Zustandekommen der Perkulationsschwelle

Diese Konzentration wird auch als Perkulationsschwelle bezeichnet. Unterhalb dieser Schwelle kommt es zwar zur Berührung einzelner Füllstoffteilchen, eine durchgehende Verbindung durch die Matrix besteht jedoch nicht. Im Fall elektrisch leitfähiger Partikel bedeutet dies,

dass der elektrische Widerstand des Gesamtsystems vom Widerstand des nichtleitfähigen Matrixmaterials bestimmt wird. Mit der Zunahme der Füllstoffteilchenkonzentration nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass sich benachbarte Teilchen berühren. Die Größe dieser sich so bildenden Teilchengruppen wächst mit dem Anstieg der Füllstoffkonzentration. Dieser Prozess setzt sich so lange fort, bis die Größe einer Teilchengruppe die Abmessung des Probekörpers erreicht. Hier wird eine sprunghafte Abnahme des Durchgangswiderstands beobachtet. Erhöht man die Füllstoffkonzentration weiter, kommt es durch das Zustandekommen zusätzlicher

leitfähiger Pfade zum weiteren Absinken des Durchgangswiderstands. Der Anstieg in diesem Bereich ist jedoch - im Vergleich mit der Perkolationsschwelle - weitaus geringer. Um reproduzierbare Ergebnisse für Widerstände und Konzentrationsverhältnisse zu bekommen, müssen die Abmessungen der Füllstoffteilchen gegenüber den Abmessungen des Compound-Probekörper sehr viel kleiner sein. Nur so sind statistisch relevante Aussagen über das System möglich. Bei den verwendeten Leitrußen liegt die Größe der Primärteilchen bei ca. 50 nm und die Größe der Rußaggregate im Bereich einiger 100 nm. Die Dicke der Compoundprobekörper liegt in der Regel über 1 mm, so dass diese Bedingung erfüllt ist.

3.7 Leitfähigkeitsmechanismen

Die elektrische Leitfähigkeit eines Stoffs ist proportional der Ladungsträgerdichte und der Beweglichkeit der Ladungsträger. Die Gesamtleitfähigkeit eines Stoffs setzt sich aus der Elektronen- und Ionenleitfähigkeit zusammen. Die Leitfähigkeit hochmolekularer Stoffe liegt in der Regel unter $10^{-12} \text{ Scm}^{-1}$. Die Leitfähigkeit der Metalle liegt in der Größenordnung $10^4 \dots 10^6 \text{ Scm}^{-1}$, die von Graphit bei 10^3 Scm^{-1} . Die Leitfähigkeitsruße weisen eine starke Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom aufgewendeten Druck auf, da sich mit der Zunahme des Drucks die Größe und die Anzahl der Berührungsstellen zwischen den Rußteilchen erhöht. Bei einem Druck von 10 MPa wurde dabei eine Leitfähigkeit in der Größenordnung von 10 Scm^{-1} beobachtet (zur Bestimmung siehe Anhang 5). Entlang des Perkolationsnetzwerks eines mit Ruß oder Metall gefüllten Compounds tritt Elektronenleitfähigkeit auf. Dabei ist eine direkte Berührung zweier benachbarter Teilchen nicht unbedingt notwendig. Bei einem Abstand von weniger als 1,5 nm überlappen sich die Elektronenwellenfunktionen. Zwischen 1,5 nm und 10 nm kommt es in Folge thermisch induzierten Tunnelns sowie von Hüpfprozessen der Elektronen zum Ladungsübergang [28].

3.8 Verteilung der Füllstoffteilchen in der Matrix / Perkolationsschwelle

3.8.1 Stochastische Verteilung

Wird ein Füllstoff homogen in einem Matrixmaterial verteilt, liegt eine stochastische Füllstoffteilchenverteilung vor. Wird in diesem Fall Füllstoff verwendet, der aus pulverförmigen - d.h. kugelähnlichen - Partikeln besteht, lässt sich der Wert der Perkolationsschwelle theoretisch bestimmen. In Abhängigkeit vom verwendeten Modell erhält man Füllgrade zwischen 20 ... 33 Vol% [8] oder 16 Vol% [39]. Die Größe der Partikel ist hierbei im Gegensatz zur Gestalt unbedeutend.

3.8.2 Ungleichmäßige Verteilung

Unter ungleichmäßiger Verteilung der Füllstoffteilchen soll verstanden werden, wenn die Füllstoffteilchen nicht homogen im Volumen der Matrix verteilt sind. Entsprechend der Ursache der Ungleichverteilung kann unterschieden werden zwischen:

- Verdrängung der Füllstoffteilchen in Folge Sphärolithbildung
- Kern-Mantel-Strukturen
- Selbstagglomeration der Füllstoffteilchen

Nicht betrachtet wird in diesem Zusammenhang Unterdispergierung des Füllstoffs im Compound in Folge eines mangelhaften Herstellungsprozesses.

a. Verdrängung

Im Fall thermoplastischer, teilkristalliner Matrixwerkstoffe wird der Füllstoff in die aufgeschmolzene - d.h. amorphe Matrix - dispergiert.

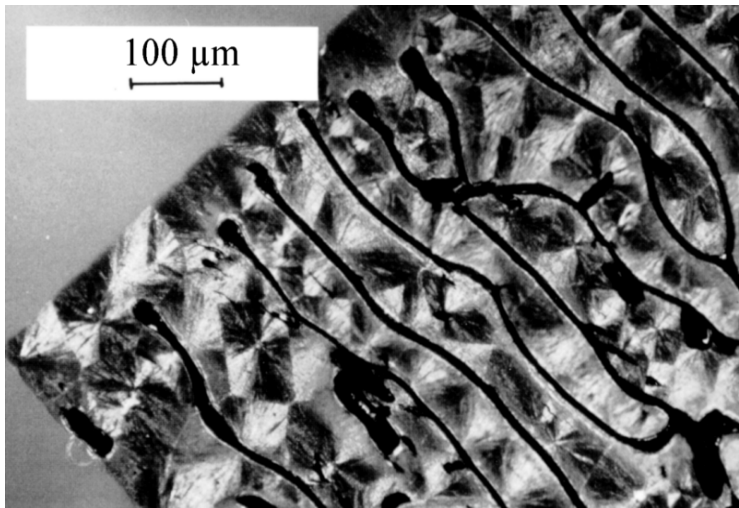


Abb. 10: Herausbildung von Rußbahnen durch Verdrängung der Rußteilchen aus den kristallinen Bereichen des Compounds (nach [11])

Im Zuge der Abkühlung des Compounds kommt es zur Herausbildung kristalliner Zonen. Der Kristallisationsprozess hat zur Folge, dass die Füllstoffteilchen aus den sich bildenden kristallinen Bereichen als Fremdkörper (analog der Metallographie) in die verbleibenden amorphen verdrängt werden (Abb. 10) [11, 12]. Es kommt zu

einem Absinken der Füllstoffteilchenkonzentration im Bereich der Sphärolithe und zu einem Anstieg in den amorphen Bereichen. Ein Absinken der Perkolationschwelle ist die Folge. So wird bei HDPE-Compounds (siehe Abschnitt 4.2.1a) ab 15 ... 20 Mas% (entsprechend 7 ... 10 Vol%) eine Leitfähigkeit in der Größenordnung 10^{-3} Scm^{-1} beobachtet.

b. Kern-Mantel Strukturen

Zur Herstellung von Compounds mit Kern-Mantel-Struktur wird das Polymer mit dem Füllstoff bei Raumtemperatur intensiv vermischt. Das Polymer sollte dabei nicht als Granulat sondern in Form von Grieß (Partikeldurchmesser kleiner 100 µm) vorliegen. Anschließend wird dieses Gemisch unter Aufwendung von Temperatur und Druck verpresst (Abb. 11).

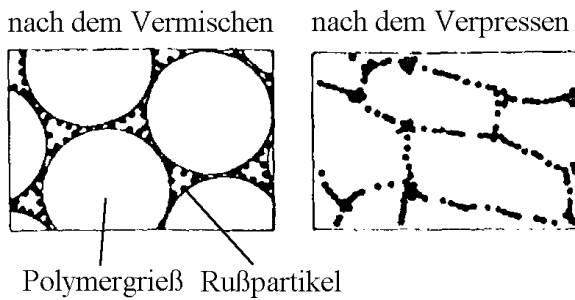


Abb. 11: Kern - Mantel - Struktur (nach [8])

Beim Mischvorgang wird die Oberfläche des Polymergrießes mit dem Füllstoff benetzt. Durch die beim Verpressen vorherrschende Temperatur schmelzen die Polymerpartikel auf. Der mit moderatem Druck durchgeführte Pressvorgang führt zu einem massiven Probekörper. Der auf der Oberfläche des

Polymergrießes befindliche Ruß formt dabei ein dreidimensionales Netzwerk.

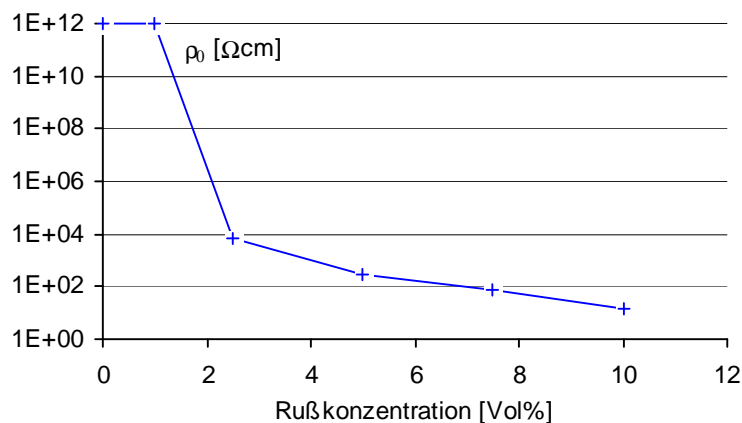


Abb. 12: Perkolationschwelle bei Kern-Mantel-Struktur

Die somit erzwungene ungleichmäßige Verteilung der Füllstoffteilchen führt zu einer sehr niedrigen Perkolationschwelle (Abb 12).

Das Vermischen des Rußes mit dem Polymergrieß erfolgte im Gegensatz zu den „normalen“ Kunststoffcompounds nicht mit

dem Laborknetter (Abb. 90) sondern in einer umgebauten kleinen Kaffeemühle. Verpresst wurde das Gemisch mit der im Anhang 3 dargestellten Handhebelpresse (Abb. 91) und einer beheizbaren Form (Abb. 93). Die Vermessung erfolgte mit dem im Anhang 2 gezeigten Aufbau.

c. Selbstagglomeration der Füllstoffteilchen

Werden Feststoffpartikel in einer Flüssigkeit ausreichend dispergiert, liegt zunächst eine homogene Verteilung vor. In Folge der Brownschen Bewegung findet eine ungerichtete stochastische Bewegung der Füllstoffteilchen in der Flüssigkeit statt. Kommt es dabei zur Annäherung zweier Partikel, wirkt auf beide eine anziehende Kraft, die London-van-der-Waals-Kraft. Diese Kraft wird um so größer, je näher sich die beiden Partikel kommen, und führt schließlich dazu, dass die beiden Partikel aneinander haften bleiben. Dieser Prozess wird als Selbstagglomeration bezeichnet (Abb. 13) [28], [29]. Von entscheidender Bedeutung in diesem Zusammenhang ist die Partikelgröße.

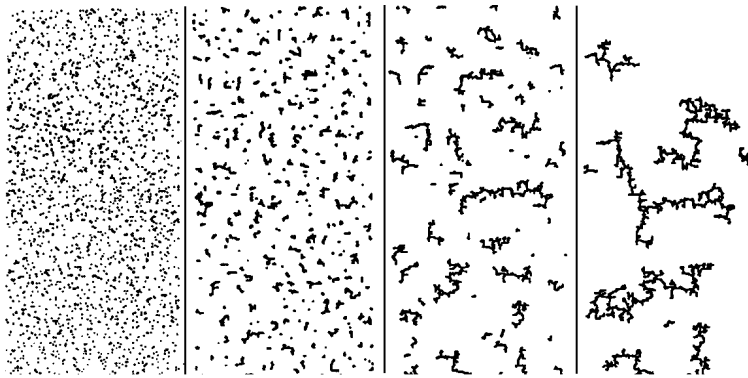


Abb. 13: Selbstagglomeration (nach [28])

$t_1=0$

$t_2>t_1$

$t_3>t_2$

$t_4>t_3$

Die Agglomeratbildung erfolgt nach folgender Beziehung [28]:

$$N(t) = \frac{N_0}{1 + \frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}} \quad \text{mit} \quad t_{\frac{1}{2}} = \frac{\pi \eta r^3}{\Phi kT}$$

N_0 .. Konzentration der Teilchen bei $t = 0$

η .. Viskosität; r .. Partikelradius

Φ .. Volumenfüllgrad

Der Prozess der Agglomeratbildung wird somit durch:

- kleine Abmessungen der Füllstoffteilchen,
- eine niedrige Viskosität des umgebenden Mediums sowie
- einen hohen Füllgrad

beschleunigt. Des weiteren wird dieser Vorgang - insbesondere bei niedrigen Füllgraden - durch leichtes Schütteln bzw. Rühren unterstützt. Die Ursache hierfür liegt bei der zusätzlichen Bewegung der Teilchen in der Flüssigkeit, wodurch die Wahrscheinlichkeit steigt, dass sich zwei Teilchen begegnen und aneinander haften bleiben.

Um die Auswirkungen der Selbstagglomeration der Füllstoffteilchen zu verdeutlichen, wird ein Compound aus Polyesterharz und Ruß betrachtet [33]. Die bei diesem Compound beobachtete Perkolationsschwelle von 0,4 Mas% Ruß führte zu Zweifeln an der Richtigkeit der Perkolationstheorie. Der beobachtete Wert von 0,4 Mas% lag so weit unter den theoretisch erwarteten Werten für eine stochastische Verteilung, dass das Vorhandensein eines Perkulationsnetzwerks ausgeschlossen wurde. Als Ersatz zur Erklärung der beobachteten Leitfähigkeit vermutete man, dass der Ruß mit den Harzmolekülen während der Aushärtung Bindungen eingehen würde. Der Ladungstransport sollte nicht nur über die Rußpartikel sondern zusätzlich noch entlang der Makromoleküle des Polyesterharzes erfolgen. Die Fortführung der Arbeiten [36] brachte zum Vorschein, dass bei schnellerer Aushärtung die Perkolationsschwelle weniger scharf ausgebildet und zu höheren Konzentrationen hin (größer 1 Mas%) verschoben war. Um eine schnellere Aushärtung des Harzes zu erreichen, erhöhte man die Temperatur von

20 auf 85 °C. Dies bewirkte eine Verkürzung der Topfzeit von 50 h auf 1 h. Man begründete das Ansteigen der Perkolationsschwelle mit dem Vorhandensein von Defekten in der Ruß-Polymer-Struktur, die Potentialbarrieren für die Ladungsträger darstellen würden. Richtig durchsetzen konnte sich dieser Ansatz nicht, da sich unter Bezug auf die Selbstagglomeration die klassische Perkolationstheorie zur Erklärung der extrem niedrigen Perkolationsschwelle erweitern lässt. Wie die Messungen im Abschnitt 6.7.3.2 belegen, kann die extrem niedrige Perkolationsschwelle nicht auf die Reaktion des Rußes mit den Harzmolekülen beim dessen Aushärtungsprozess zurückzuführen sein, da bei andersartigen Stoffen wie Petroleum oder Silikonöl eine vergleichbar niedrige Perkolationsschwelle beobachtet wird.

Wie in Abbildung 13 schematisch dargestellt ist, wird mit dem Fortschreiten der Zeit ein Anwachsen der Agglomerate beobachtet. Somit wird deutlich, warum die Perkolationsschwelle von Polyesterharz und Ruß bei einer Topfzeit von 50 Stunden kleiner (0,4 Mas%) als bei 1 Stunde Topfzeit (1 Mas%) ist.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Perkolationsschwelle in Abhängigkeit der Art der Füllstoffteilchenverteilung in den folgenden Größenordnungen liegt:

- stochastische Verteilung: 25 Vol%
- Verdrängung durch Sphärolithbildung: 7 Vol%
- Kern-Mantel-Struktur: 2 Vol%
- Selbstagglomeration der Füllstoffteilchen: 0,4 Vol%

Welche Verteilungsart im Einzelfall dominierend ist, hängt von den spezifischen Eigenschaften des Zwei-Komponenten-Systems ab. Vergleicht man auf dieser Basis ein Thermoplast mit dem oben angeführten Polyesterharz wird man feststellen, dass beim Thermoplast im Allgemeinen der Zeitbereich in dem das Compound flüssig ist (entspricht der Verarbeitungszeit von wenigen Minuten) geringer sowie die Viskosität der Schmelze höher ist. Somit liegen hier ungünstigere Bedingungen zur Agglomeratbildung vor.

Neben der Art der Füllstoffteilchenverteilung existieren noch weitere Faktoren, welche die Lage der Perkolationsschwelle beeinflussen (siehe dazu Abschnitt 4).

3.9 Temperaturkoeffizient des Widerstands

Zum Ladungstransport über das Perkulationsnetzwerk ist es nicht unbedingt erforderlich, dass sich die Füllstoffteilchen direkt berühren. Bis zum Abstand von 10 nm kann durch thermisch induziertes Tunneln:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{\frac{-T_1}{T+T_0}} \text{ mit } \sigma \text{ .. Leitfähigkeit und } \sigma_0, T_0, T_1 \text{ .. Parameter}$$

sowie durch Hüpfprozesse der Elektronen:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\left(\frac{T_0}{T}\right)^\alpha} \text{ mit } \sigma \text{ .. Leitfähigkeit und } \sigma_0, T_0, \alpha \text{ .. Parameter}$$

ebenfalls ein Ladungsübergang erfolgen. Betrachtet man die Beschreibungsgleichungen beider Prozesse bzw. den Temperaturkoeffizienten des Widerstands von Kohlenstoff ($-4,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$), müsste eine Verringerung des Widerstands bei Temperaturerhöhung festzustellen sein. Die experimentellen Befunde weisen jedoch im Durchgangs- und Sprungbereich das Gegenteil auf.

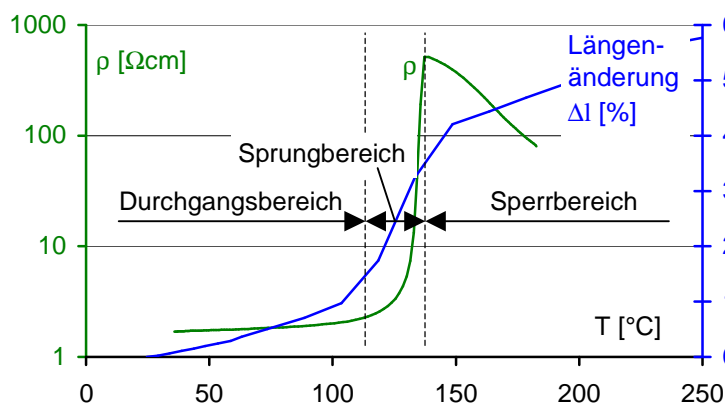


Abb. 14: Zusammenhang zwischen Ausdehnung und Widerstand

Das Gesamtverhalten in diesen Bereichen muss somit von einem Prozess bestimmt werden, welcher durch seine Intensität die drei vorhergenannten überlagert. In der Literatur (z.B. [7]) wird dafür übereinstimmend die thermische Ausdehnung der Matrix genannt.

Stellt man die Ausdehnung des

Compounds in Abhängigkeit der Temperatur dem Widerstand gegenüber, erhält man im Fall teilkristalliner thermoplastischer Matrixwerkstoffe das in Abbildung 14 dargestellte Verhalten. Die Ermittlung der Längenänderung erfolgte unter der Annahme der Isotropie des Materials aus dem kubischen Ausdehnungskoeffizienten. Dieser wurde mit einem Flüssigkeitsdilatometer in Quecksilber bestimmt. Die Bestimmung von $\rho(T)$ erfolgte mit Hilfe des im Anhang 2 dargestellten Versuchsaufbaus. Vergleicht man den Längenausdehnungskoeffizienten mit dem spezifischen Widerstand, wird ein Zusammenhang der beiden Größen ersichtlich.

Der Ausdehnungskoeffizient des in Abbildung 14 dargestellten Compounds liegt im Bereich von $20 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$ bei ca. 10^{-4} K^{-1} , für Kohlenstoff hingegen bei nur ca. $2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Diese Differenz führt bei Temperaturerhöhung zu einer stärkeren Ausdehnung des Kunststoffes gegenüber dem Kohlenstoff. Somit kommt es zu einer Verringerung der Anzahl der Berührungstellen zwischen den Füllstoffteilchen sowie zu einem Anstieg des Abstands der Füllstoffteilchen. Beides führt zu einem Anstieg des Compoundwiderstands. Im Durchgangsbereich - das heißt im Temperaturbereich unterhalb des Kristallitschmelzbereichs - hat dies zwischen Raumtemperatur und dem

Beginn des Sprungbereichs einen Widerstandsanstieg in der Größenordnung von 50 % zur Folge. Der sich anschließende Sprungbereich ist durch das Schmelzen der kristallinen Bereiche gekennzeichnet. Es erfolgt eine vermehrte Zunahme des Volumens. Der Längenausdehnungskoeffizient steigt auf 10^{-3} K^{-1} . Es kommt verstärkt zur Vergrößerung des Füllstoffteilchenabstands über 10 nm, was zu dem beobachteten Widerstandsanstieg um einige Größenordnungen führt [21]. Dieses Verhalten wird in der Literatur oft als PTC-Effekt bezeichnet.

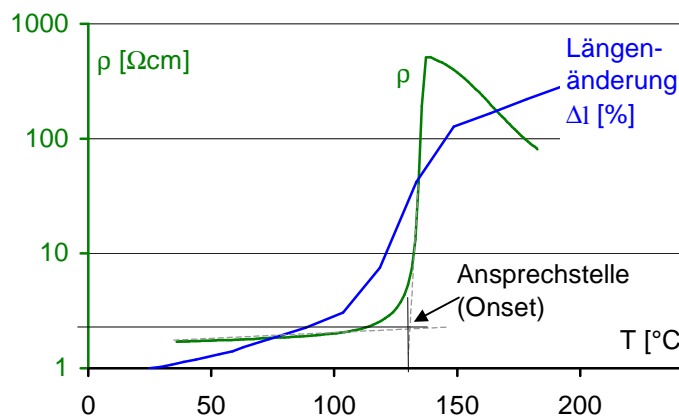


Abb. 15: Definition der Ansprechstelle

Der Übergang von dem niederohmschen Zustand im Durchgangsbereich in den hochohmigen Zustand des Sperrbereichs wird im Folgendem auch als Ansprechen bezeichnet. Unter dem Ansprechen oder dem Ansprechpunkt wird die Stelle verstanden (Abb. 15), die man in der Thermoanalyse als

Onset bezeichnet [49]. Der Onset ergibt sich aus dem Schnittpunkt der extrapolierten Basislinie (Widerstandsanstieg im Durchgangsbereich) mit einer Tangente an die durch den Effekt (Widerstandsanstieg durch PTC-Effekt) verursachten Kurve.

Das Auftreten des PTC-Effekts ist nicht auf die teilkristallinen Thermoplaste beschränkt. Es wird ebenfalls, wenn auch in abgeschwächter Form, beim Glasübergang von Epoxidharz beobachtet [34]. Hier wird analog zu den Thermoplasten im Bereich der Kristallitschmelze eine Überhöhung des Ausdehnungskoeffizienten beobachtet.

3.10 NTC-Effekt

An den Sprungbereich schließt sich bei weiterer Temperaturerhöhung der Sperrbereich an (Abb. 14). Hier ist der Längenausdehnungskoeffizient fast doppelt so hoch wie im Durchgangsbereich. Dennoch ist ein Rückgang des Widerstands zu beobachten. In der Literatur wird dieses Verhalten als NTC-Effekt bezeichnet. Zur Erklärung sind jedoch kaum Ansätze zu finden. In [7] vermutet man, dass sich die Füllstoffpartikel in der Schmelze bewegen und eine neue, gleichförmigere aber auch besser leitfähige Füllstoffteilchenanordnung formen. Unbeantwortet bleiben die Fragen nach der Ursache für dieses Verhaltens und warum eine gleichförmigere Verteilung eine bessere Leitfähigkeit aufweist. Zieht man jedoch die Betrachtungen von Abschnitt 3.8.2c heran, so lässt sich dieses Verhalten erklären. Dazu soll ein Ausschnitt eines Perkulationsnetzwerks zwischen 2

Sphärolithen betrachtet werden. (Die Herleitung des nachfolgend dargestellten Modells erfolgt in Abschnitt 5.7.2).

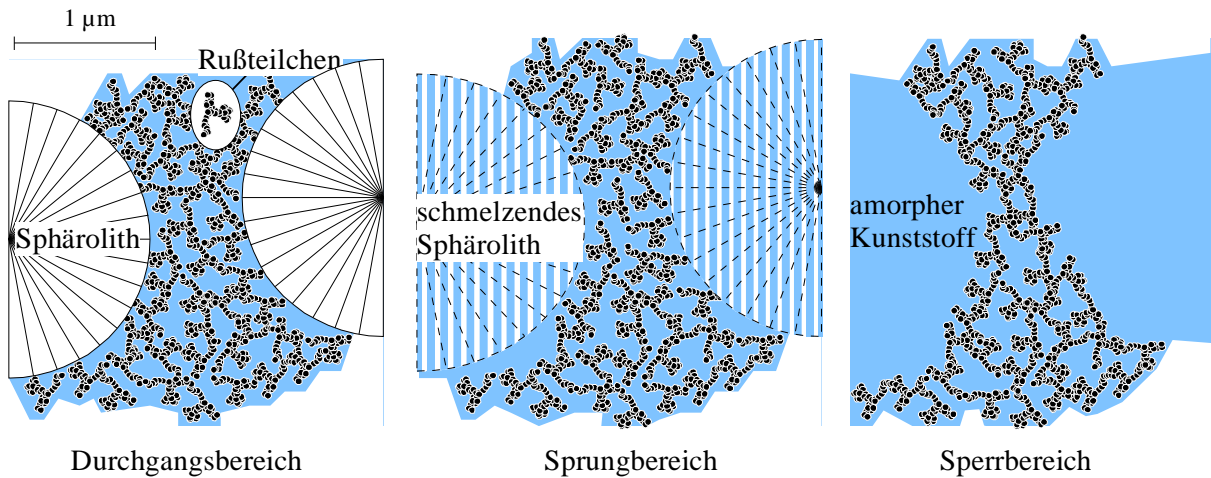


Abb. 16: Modell zur Erklärung des NTC-Effekts

Im Durchgangsbereich berühren sich die Füllstoffteilchen bzw. liegt deren Abstand unter 10 nm. Im Sprungbereich kommt es durch das Schmelzen der Sphärolithe zu einer sprunghaften Volumenzunahme. Ein größerer Anteil der Füllstoffteilchen wird auf einem Abstand von größer als 10 nm separiert, was einen Widerstandsanstieg über einige Größenordnungen zur Folge hat. Mit dem Aufschmelzen des Matrixmaterials ist eine erhebliche Verringerung der Viskosität verbunden. Da zwischen den Füllstoffteilchen die anziehende London-van-der-Waals-Kraft wirkt, kann es nun zur Agglomeration zwischen benachbarten Füllstoffteilchen kommen. Die damit verbundene Verringerung des Füllstoffteilchenabstands bzw. die Erhöhung der Anzahl der Berührungsstellen zwischen den Füllstoffteilchen, führt zu einem Absinken des Compoundwiderstands (Abb. 16).

Um diese Vorstellung zu verifizieren wird die Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur bei unterschiedlichen Vernetzungsgraden der Matrix betrachtet. Die Vernetzung teilkristalliner Thermoplaste erfolgt zum überwiegenden Teil in den amorphen Bereichen [35]. Es kommt zur Herausbildung von Querverbindungen zwischen benachbarten Makromolekülen.

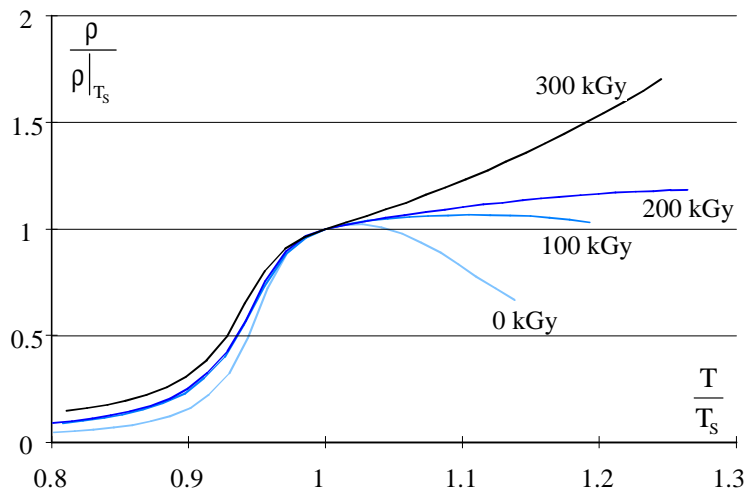


Abb. 17: Abhängigkeit des Widerstandsanstiegs für $T > T_s$ in Abhängigkeit von der Strahlendosis / Vernetzungsgrad

Die Folge dessen ist, dass der Kunststoff in den vernetzten Bereichen nicht mehr „richtig“ aufschmilzt, das heißt, nicht mehr niedrigviskos wird. Da sich der Füllstoff in den amorphen Bereichen des Kunststoffs befindet, wird mit zunehmender Vernetzung die Viskosität oberhalb der Schmelztemperatur zunehmen. Die Füllstoffteilchen werden in ihrer

Neigung zur Agglomeration behindert, was zur Abnahme der Intensität des NTC-Effekt führt (Abb.17). Bei dem dargestellten Beispiel handelt es sich um Proben aus LDPE mit einem Rußgehalt von 35 Mas%. Die Herstellung und Vermessung der Proben erfolgte mit den in den Anhängen 3 und 2 dargestellten Gerätschaften. Die Vernetzung wurde mit Hilfe eines Elektronenbeschleunigers vorgenommen. Die Einstellung der Strahlendosis geschieht durch die Staffelung der Expositionszeiten. Ein Maß für die Strahlendosis ist dabei Gray (1 Gy = 1 J/kg). Grundlegendes zur Vernetzung (insbesondere der Strahlenvernetzung) ist in [40] zu finden. Darstellungen zur Eignung der Kunststoffarten, zur notwendigen Strahlendosis sowie zu erreichbaren Vernetzungsgraden befinden sich in [5], [6] sowie [35].

4 Compoundoptimierung für die Strombegrenzung

4.1 Zielfunktionsdefinition

Die unterschiedlichen Anwendungsgebiete leitfähiger Polymercompounds erfordern auf den Anwendungszweck hin optimierte Eigenschaftsprofile. Um ein für die Strombegrenzung optimiertes elektrisches Eigenschaftsprofil abzuleiten, wird die nachfolgende Betrachtung angestellt (Abb. 18).

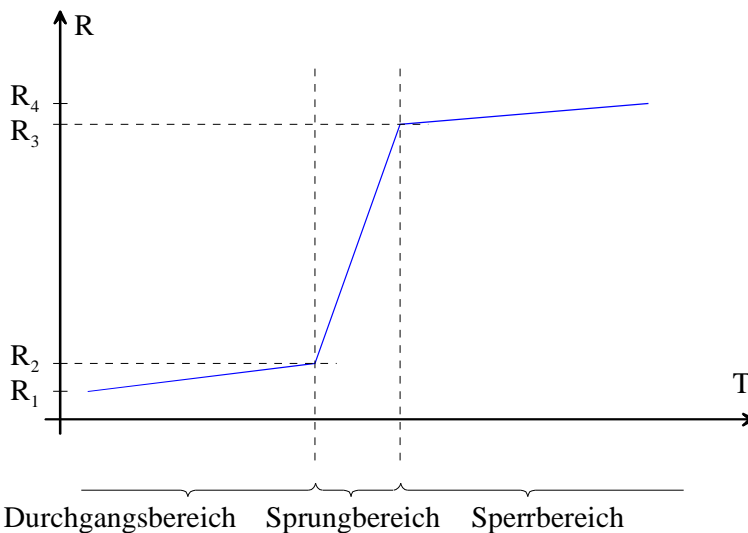


Abb. 18: Zielfunktionsdefinition

Zur Ermöglichung einer hohen Stromtragfähigkeit bei geringer Verlustleistung im Nennbetrieb

sollte $R_1 = \rho_0 \frac{d}{A}$ so niedrig

wie möglich sein. Um jedoch gleichzeitig im Fehlerfall ein schnelles Auslösen (Übergang in den Sperrbereich) zu gewährleisten, kann die Compound-

fläche A (und damit das Compoundvolumen) nicht beliebig groß gewählt werden. Mit der Zunahme des Volumens eines polymeren Strombegrenzers ist die Zunahme der bis zum Beginn der Begrenzung notwendigen Energiemenge verbunden. Somit ist die Strombegrenzung um so schlechter, je größer das Volumen gewählt wird. Da in Folge jedes Schaltversuchs Materialverlust (siehe Abschnitt 6.4.3.3) eintreten kann, der Strombegrenzer aber mehreren Kurzschlussbeanspruchungen standhalten soll, kann die Dicke d ebenfalls nicht beliebig verringert werden. Somit ist der spezifische Kaltwiderstand ρ_0 des Compounds der Parameter, welcher so niedrig wie möglich zu gestalten ist.

Die Widerstandsveränderung im Durchgangsbereich ($S_{\text{DURCH}} = R_2 / R_1$) sollte zur Einstellung eines stabilen Arbeitspunkts im Nennbetrieb möglichst Eins oder kleiner als Eins sein. Wegen der physikalischen Gegebenheiten (vergleiche Abschnitt 3.9) ist dies jedoch nicht erreichbar. Somit ist als Zielfunktion für S_{DURCH} zu formulieren, dass S_{DURCH} dem Wert 1 möglichst nahe kommen soll. Der Widerstandsunterschied im Sprungbereich, welcher nachfolgend auch als Sprunghöhe ($S = R_3 / R_2$) bezeichnet wird, soll - zum Erreichen einer guten Strombegrenzung - möglichst groß sein.

Damit auch für den weiteren Verlauf der Kurzschlusschaltung eine gute Strombegrenzung

aufrecht erhalten wird, sollte die Widerstandsveränderung im Sperrbereich ($S_{\text{SPERR}} = R_4 / R_3$) möglichst größer als Eins sein. In der Regel liegt dieser Wert jedoch (siehe Abschnitt 3.10) bei Werten kleiner als Eins. Für unvernetztes Material ist somit als Zielfunktion für S_{SPERR} zu formulieren, dass S_{SPERR} möglichst nicht viel kleiner als Eins sein sollte.

Da der polymere Strombegrenzer wiederverwendbar sein soll, ist die Forderung nach einem reproduzierbaren $R(T)$ zu erheben.

Zusammenfassend können die folgenden Zielstellungen für die Optimierung aufgestellt werden:

- spezifischer Compoundwiderstand (ρ_0): ↓
- Widerstandsveränderung im Durchgangsbereich (S_{DURCH}): ↓
- Sprunghöhe (S) und Widerstandsveränderung im Sperrbereich (S_{SPERR}): ↑
- Reproduzierbarkeit von $R(T)$

4.2 Einflussfaktoren auf die Eigenschaften additiv ausgerüsteter Polymercompounds

Nachfolgend soll an Hand einer Auswahl von Einflussfaktoren bzw. Materialparametern gezeigt werden, welchen Einfluss diese auf die im Abschnitt 4.1 formulierten Zielfunktionen besitzen. Es wird unterschieden nach Einflüssen, die bedingt sind durch das Matrixmaterial, den Füllstoff sowie die Verarbeitungsbedingungen. Zur Vermessung der Compounds wird die im Anhang 2 dargestellte Versuchseinrichtung genutzt. Die Compoundherstellung erfolgt mit einem Laborknetter der Marke Brabender und einer Handhebelpresse (Anhang 3).

4.2.1 Einflüsse bedingt durch das Matrixmaterial

Die Forderung nach einer reproduzierbaren Abhängigkeit des Compoundwiderstands von der Temperatur führt zu der Forderung, dass das Kristallisationsverhalten des Kunststoffes möglichst unabhängig von Einflussfaktoren wie Abkühlgeschwindigkeit oder Füllstoff sein sollte. Es ist bekannt, dass insbesondere feinkörnige Füllstoffpartikel und damit auch Ruß [12] nukleierend - das heißt keimbildend - wirken. Die Abkühlgeschwindigkeit ist des weiteren von nicht zu vernachlässigender Bedeutung für den Kristallinitätsgrad. Bei der Verwendung als Strombegrenzer treten verschiedenartige Belastungen (Nennbetrieb bis Kurzschluss) auf, welche entsprechend unterschiedliche Temperaturgradienten zur Folge haben. Da sich die Struktur und damit die elektrischen Parameter der Compounds in dessen Folge nicht verändern sollen, ist ein Matrixmaterial auszuwählen, welches unempfindlich gegenüber diesen Einflüssen ist. Prädestiniert sind in diesem Zusammenhang Materialien, die über eine intrinsisch hohe Keimneigung verfügen und somit nur kleine Sphärolithe bilden. Eine intrinsisch hohe Keimneigung verringert die

zusätzlich nukleierende Wirkung von Füllstoffen. Die Ausbildung kleiner Sphärolithe garantiert einen schnellen Kristallisationsprozess. Somit wird als bevorzugter Matrixwerkstoff für die Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit Polyethylen ausgewählt. Des weiteren spricht für die Verwendung von PE

- die strukturbedingt erreichbaren hohen Werte für die Kristallinität,
- die gute Umweltverträglichkeit und Nichttoxizität der Zersetzungsprodukte sowie
- die geringen Kosten.

a. Kristallinität

Unter der Kristallinität eines Kunststoffes versteht man das Verhältnis vom kristallinen Anteil zum Gesamtvolumen.

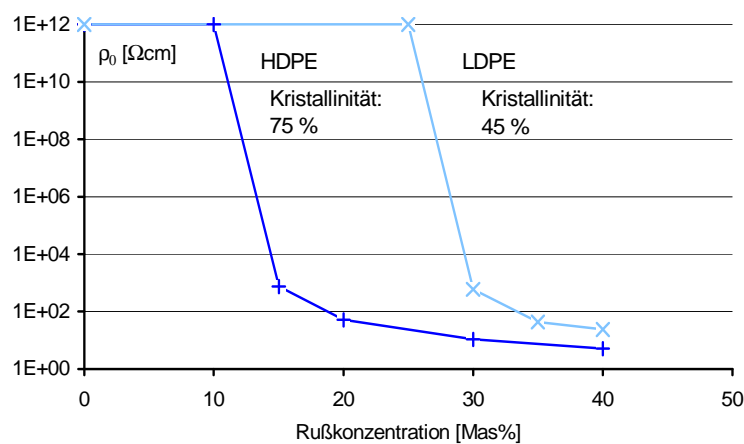


Abb. 19: Abhängigkeit der Compoundleitfähigkeit von der Kristallinität des Matrixmaterials

Je höher die Kristallinität des Matrixmaterials ist, desto geringer ist der amorphe Kunststoffanteil. Da sich der Füllstoff überwiegend in den amorphen Anteilen befindet, wird bei gleichem Füllgrad aber höherer Kristallinität eine höhere Füllstoffkonzentration in den amorphen Bereichen beobachtet. Dies äußert sich in einer Verringerung der Perkolationsschwelle bzw. in einer Verbesserung der Leitfähigkeit bei vergleichbarer Füllstoffkonzentration (Abb. 19).

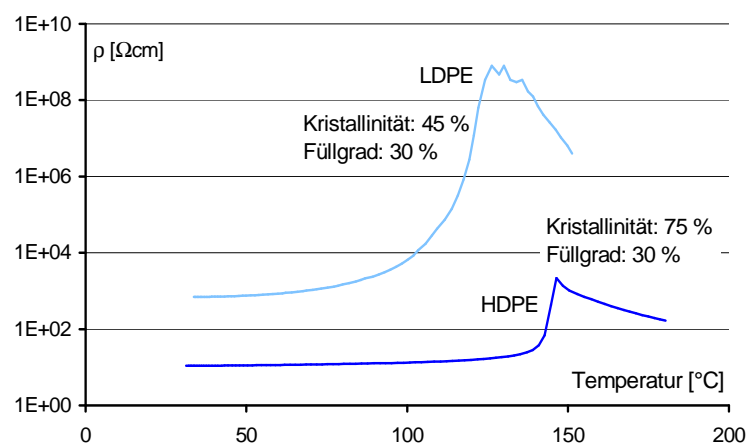


Abb. 20: Einfluß der Kristallinität auf $R(T)$

Die durch eine höhere Kristallinität bedingte höhere Füllstoffteilchenkonzentration in den Zweigen des Perkulationsnetzwerks (amorphen Kunststoffbereichen) hat neben der höheren Leitfähigkeit auch einen geringeren Widerstandsanstieg im Durchgangsbereich zur Folge (Abb. 20). Jedoch ist eine höhere Füllstoffteilchenkonzentration auch mit einer Verringerung der Sprunghöhe verbunden.

b. Kristallitgröße

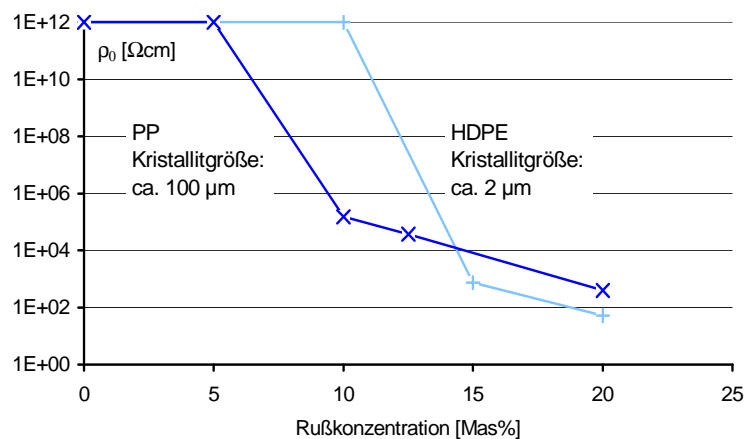


Abb. 21: Einfluß der Sphärolithgröße auf die Perkolationsschwelle

isotaktischem PP sogar 98 ... 99 % erreichbar sein. Die beobachtete Perkolationsschwelle liegt bei vergleichbarer Kristallinität bei PP niedriger als bei PE (Abb. 21).

c. Kristallitschmelzpunkt

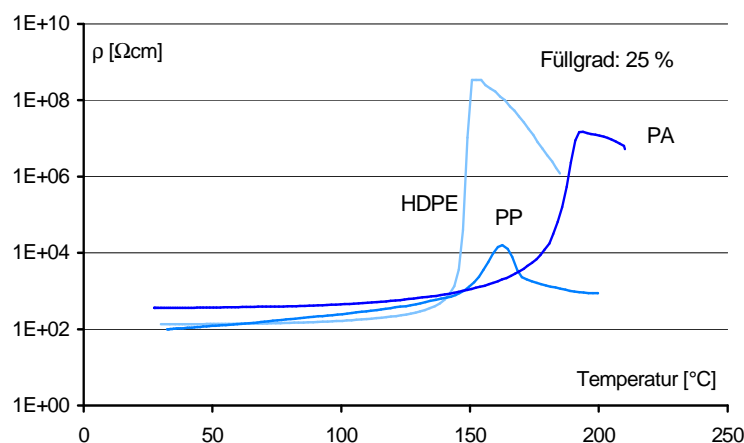


Abb. 22: Zusammenhang zwischen Kristallitschmelzpunkt und Sprungtemperatur

tragfähigkeit realisieren. Bei Dimensionierung auf gleiche Stromtragfähigkeit hingegen wäre eine höhere Umgebungstemperatur zulässig. Eine höhere Sprungtemperatur ist jedoch auch mit einer größeren notwendigen Energiemenge bis zum Auslösen und damit mit einer schlechteren Strombegrenzung verbunden.

Die Kristallitgröße beträgt bei PE ca. $2\ \mu\text{m}$, bei PP hingegen $100\ \mu\text{m}$. Bei der Herstellung von PP-Pressplatten und Abkühlzeiten im Minutenbereich sind Kristallinitätsgrade zwischen 70 ... 75 % erreichbar. Durch einen anschließenden Tempervorgang (3h bei $140\ ^{\circ}\text{C}$) sind 80 ... 87 % möglich. Theoretisch sollen lt. BASF bei

d. mittlere molare Masse

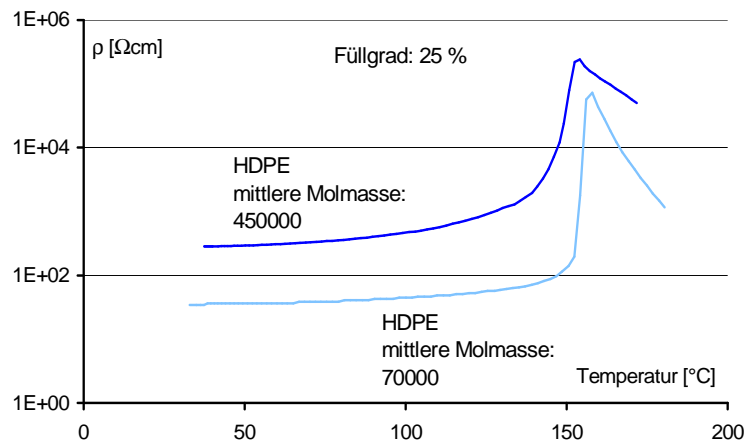


Abb. 23: Zusammenhang zwischen der molaren Masse des Matrixmaterials und der Ausprägung des NTC-Effekts

Der negative Anstieg des Widerstands im Sperrbereich (NTC-Effekt) lässt sich - analog zur Vernetzung (siehe Abschnitt 3.10) - durch eine Erhöhung der molaren Masse des Matrixwerkstoffs verringern (Abb. 23). Da die Wahl eines Matrixwerkstoffs mit höherer molarer Masse mit einer Erhöhung der Viskosität der Schmelze

verbunden ist, erhöht sich damit auch der Schwierigkeitsgrad bei der Verarbeitung.

Weiterhin ist beim HDPE mit der höheren molaren Masse ein größerer Wert für ρ_0 sowie ein breiterer Sprungbereich zu beobachten. Zurückzuführen ist der größere ρ_0 -Wert auf eine geringere Kristallinität sowie der breitere Sprungbereich auf eine breitere Molmassenverteilung.

4.2.2 Einflüsse bedingt durch den Füllstoff

a. Füllstoffkonzentration

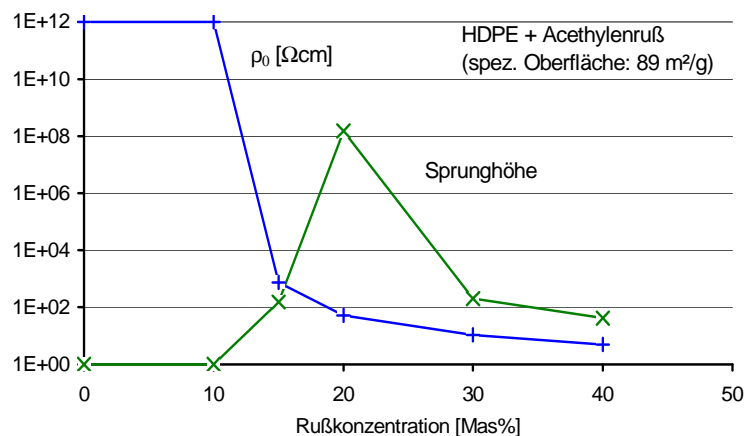


Abb. 24: Auswirkungen des Füllgrads auf die Leitfähigkeit und die Sprunghöhe

Das Zustandekommen des Perkulationsnetzwerks ist die Ursache für den stark nichtlinearen Zusammenhang zwischen Compoundleitfähigkeit und Füllstoffkonzentration.

Für den Zusammenhang zwischen Sprunghöhe und Füllstoffkonzentration ist das Vorhandensein eines Maximums charakteristisch

(Abb. 24). Dies wurde auch in [21] festgestellt.

b. Füllstoffteilchengestalt

Die Form realer Füllstoffteilchen ist meist nicht exakt benennbar. So spricht man z.B. von kugelförmigen, plättchenförmigen, faserförmigen o.ä. Füllstoffteilchen. Insbesondere bei kleineren Füllstoffteilchenabmessungen wird häufig noch eine Überstruktur (Aggregate, Agglomerate: siehe

Abschnitt 3.5) beobachtet. Um den Vergleich verschiedener Füllstoffteilchen zu ermöglichen, wurde eine Reihe von Klassifikatoren (spezifische Oberfläche [m^2/g], Struktur, Porosität, DBP-Absorption) geschaffen. Zur Definition und Abgrenzung wird auf [11] verwiesen.

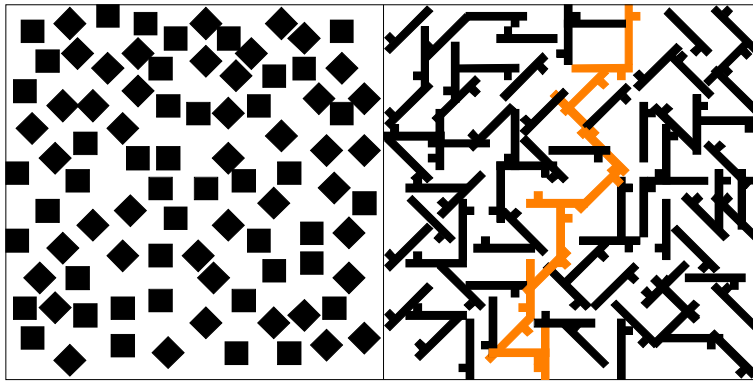


Abb. 25: Einfluß der Füllstoffteilchengestalt auf die Ausbildung leitfähiger Pfade durch die Matrix

Um die Auswirkung dieser Parameter auf die elektrischen Eigenschaften der Compounds zu verdeutlichen, wird die folgende Betrachtung angestellt (Abb. 25). Auf einer Fläche deren Größe 25 Einheiten beträgt, werden 88 Füllstoffteilchen mit einer Größe von jeweils 9 Flächeneinheiten verteilt. Im ersten Fall beträgt das Verhältnis Länge / Breite = 1 / 1, im zweiten hingegen 4 / 1. Der Flächenfüllgrad liegt in beiden Fällen bei 32 %. Während bei den Teilchen mit niedriger Struktur kein durchgehender Pfad zu erkennen ist, ist dieser im zweiten Fall vorhanden.

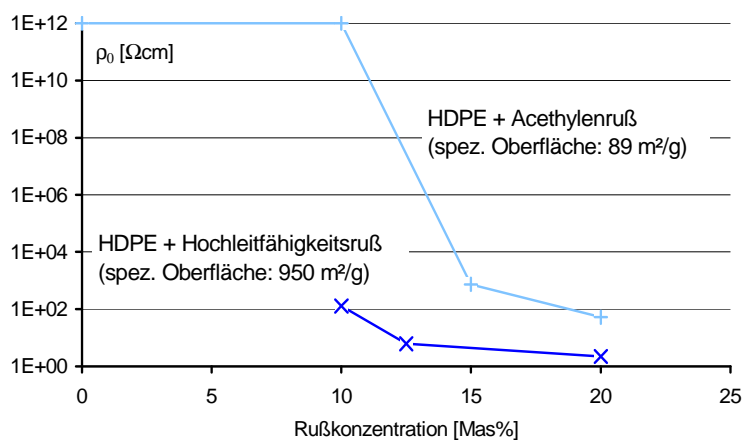


Abb. 26: Einfluss der Struktur der Füllstoffteilchen auf die Lage der Perkolationschwelle

Um die Auswirkung dieser Parameter auf die elektrischen Eigenschaften der Compounds zu verdeutlichen, wird die folgende Betrachtung angestellt (Abb. 25). Auf einer Fläche deren Größe 25 Einheiten beträgt, werden 88 Füllstoffteilchen mit einer Größe von

Um eine Aussage über die Füllstoffteilchengestalt der Leiter zu vorzunehmen, wird in der Praxis oft die spezifische Oberfläche angegeben. Dabei liegt die Perkolationschwelle um so niedriger, je größer der Wert für die spezifische Oberfläche ist (Abb. 26).

c. Leitfähigkeit der Füllstoffpartikel

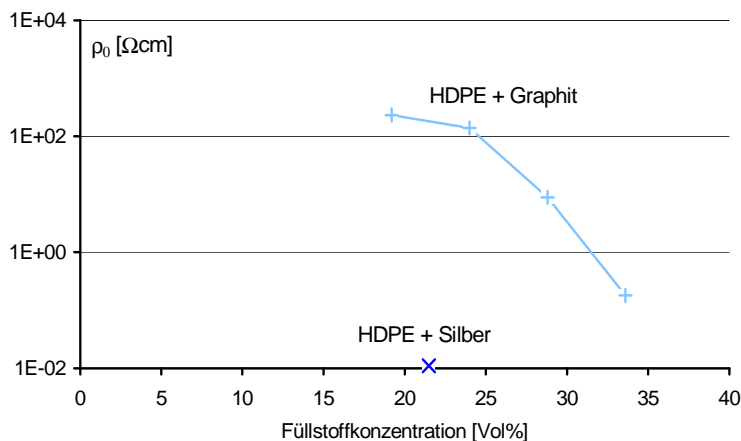


Abb. 27: Einfluss der Füllstoff- auf die Compoundleitfähigkeit

etwas größeren Verbesserung der Compoundleitfähigkeit (Abb. 27). Die Gestalt der Füllstoffteilchen ist in beiden Fällen kugelförmig. Die mittlere Größe der Silberpartikel liegt bei 12 μm die des Graphits bei 20 μm .

d. Partikelgröße

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, ist die Leitfähigkeit der Füllstoffteilchen für die Leitfähigkeit des Compounds von entscheidender Bedeutung.

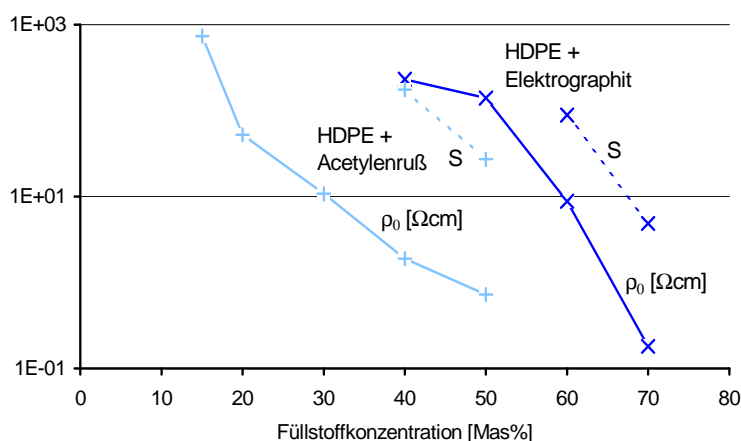


Abb. 28: Einfluss der Größe der Füllstoffteilchen auf die Lage der Perkolationschwelle

wegen der dann im allgemeinen niedrigeren spezifischen Oberfläche (Acetylenruß: 89 m^2/g , Elektrographit: 0,65 m^2/g) - höhere Füllgrade erreichbar. Hieraus können sich bei höchsten Füllgraden Vorteile bezüglich der Compoundleitfähigkeit ergeben. Der Transport der Ladungsträger über eine bestimmte Strecke kann ungehemmter erfolgen, da die Anzahl der Übergangswiderstände geringer ist. Allerdings führt dies bei vergleichbarer Leitfähigkeit zu kleineren Sprunghöhen.

Wie die nebenstehende Betrachtung zeigt, besteht zwischen der Füllstoff- und der Compoundleitfähigkeit ein direkter Zusammenhang. So führt eine Verringerung des spezifischen Widerstands der Füllstoffteilchen von $1,4 \cdot 10^{-3} \Omega\text{cm}$ (Graphit) auf $1,6 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$ (Silber) bei vergleichbarer Gestalt und Partikelgröße zu einer sogar noch

Ebenfalls einen Einfluss auf die Compoundleitfähigkeit besitzt die Größe der Füllstoffteilchen.

So hat die Verwendung größerer Partikel (Acetylenruß: Primärteilchendurchmesser: 50 nm, Elektrographit: 20 μm) eine Erhöhung der Perkolationschwelle zur Folge (Abb. 28). Bei Verwendung größerer Füllstoffteilchen sind -

4.2.3 Einflüsse bedingt durch das Herstellungsverfahren

a. Füllstoffdispergierung

Die elektrischen Eigenschaften der Compounds werden von der Verteilung der Füllstoffpartikel im Matrixmaterial während der Herstellung beeinflusst. Man unterscheidet zwischen Unter- und Überdispergierung [10]. Wird die Einmischzeit zu kurz gewählt, ist der Füllstoff in der Matrix ungenügend verteilt (Unterdispergierung). Insbesondere kleinere Füllstoffpartikel mit höherer Struktur (Leitruße) liegen noch in Form größerer Agglomerate vor. Im Fall der Überdispergierung hingegen liegt eine gute Verteilung der Füllstoffpartikel in der Matrix vor. Jedoch kann es in Folge der hohen in das Compound eingebrachten Scherenergie bei schersensiblen Füllstoffen - wie im Fall der Leitruße - zu einer Degradation der Struktur kommen. Um die Rußaggregate, die sich zu Agglomeraten zusammengefunden haben, wieder voneinander zu trennen, ist ein gewisses Maß an Scherenergie zur homogenen Verteilung des Rußes in einer Polymerschmelze nötig. Bei diesem Vorgang kommt es nicht nur zur Trennung der Agglomerate zu Aggregaten sondern auch zum Bruch der Aggregate. Wesentlich für das Zerschneiden der Aggregate ist die in das Compound eingebrachte Scherenergie. Diese ist in erster Linie von der Intensität der Vermischung das heißt von der Mischdauer abhängig. Ebenfalls nicht vernachlässigbar ist die Viskosität der Schmelze. Liegt eine hochviskose Schmelze vor, wird in der gleichen Zeit mehr Scherenergie eingebracht als bei einer niedrigviskosen Schmelze. Die Viskosität der Schmelze ist dabei wesentlich vom Füllgrad, von der spezifischen Oberfläche des Füllstoffs, von der molaren Masse des Matrixmaterials und der Verarbeitungstemperatur abhängig.

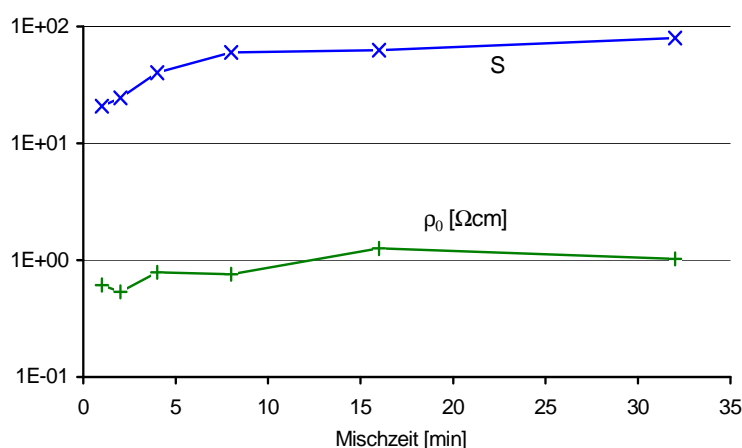


Abb. 29: Einfluss der Mischzeit auf Kaltwiderstand und Sprunghöhe

Im dargestellten Beispiel (Abb. 29) wird ein Compound aus einem - wegen seiner niedrigen mittleren molaren Masse von 70000 g/mol - niedrigviskosen HDPE und einem Acetylenruß betrachtet. Der Füllgrad beträgt 50 Mas%. Die Auswirkungen der Degradation der Struktur des verwendeten Rußes sind deutlicher sichtbar. Mit zu-

nehmender Mischzeit ist eine fortschreitende Zunahme des Compoundwiderstands, welche von einem Anstieg der Sprunghöhe begleitet wird, zu beobachten.

In [10] wird beschrieben, dass das Vorhandensein von Rußklümpchen (größeren Agglomeraten) in der Schmelze - in Folge einer Unterdispergierung - zu einer Verschlechterung der Leitfähigkeit führt. Als Ursache dafür wird die schlechtere Ausbildung des Perkulationsnetzwerks genannt. Für den betrachteten Mischzeitrahmen (1 min ... 32 min) kann dieses nicht bestätigt werden. Die Ursache für die abweichende Beobachtung könnte bei der recht hohen Rußkonzentration der untersuchten Compounds liegen. Es ist vorstellbar, dass bei Füllstoffkonzentrationen die näher an der Perkulationsschwelle liegen, das in [10] dargestellte Verhalten an Bedeutung gewinnt.

b. Vorzugsrichtung

In Abhängigkeit von der Verarbeitungsart sowie der Füllstoffteilchenform kann es im Zuge der Compoundherstellung zur Ausrichtung der Füllstoffteilchen kommen [12]. Dabei werden faserförmige Füllstoffteilchen eher zur Ausrichtung neigen als sphärische Teilchen. Eine Ausrichtung der Füllstoffteilchen hat eine Anisotropie der elektrischen Eigenschaften zur Folge. Während spritzgegossenes oder extrudiertes Compoundmaterial in der Regel eine Vorzugsrichtung der Füllstoffteilchen aufweist, ist dies bei granuliertem und anschließend verpresstem Compoundmaterial weniger ausgeprägt. Da Leitruße eher zu den Füllstoffteilchen mit faserförmiger Gestalt zu rechnen sind, wird bei ihnen eine Ausrichtung beobachtet. Die Ausrichtung erfolgt dabei längs des Strömungsgradienten der Compoundschmelze bei der Herstellung. In dieser Richtung ist der geringste elektrische Widerstand zu beobachten. Bei den nachfolgend angeführten Beispielen handelt es sich um verschiedene Chargen extrudierten Materials (HDPE + ca. 40 % Ruß). Aus diesen wurden im rechten Winkel zueinander Proben mit der Orientierung A und B entnommen. Zur Vermessung dieser Proben wurde die Vier-Punkt-Messung angewendet (Anhang 4) .

Charge	ρ_{0_A} [Ωcm]	ρ_{0_B} [Ωcm]
1	1.12	0.84
2	1.22	0.99
3	1.03	0.79

Tab. 1: Richtungsabhängigkeit des spezifischen Compoundwiderstands

Es ist bekannt, dass durch Tempern knapp unterhalb des Kristallitschmelzpunkts die Kristallinität von teilkristallinen Kunststoffen vergrößert werden kann. Wegen der sehr kurzen Kristallisationszeiten ist jedoch bei PE zwischen Compounds, welche im Sekundenbereich abgekühlt wurden, gegenüber solchen die einige Stunden getempert wurden, kein Unterschied feststellbar. Dennoch beobachtet man bei den getemperten Proben eine Verbesserung der Leitfähigkeit. Es ist somit zu vermuten, dass es sich hierbei um Agglomerationserscheinungen der

Füllstoffteilchen handelt. Dieser Vorgang schreitet nur langsam voran, da die Viskosität des Compounds knapp unterhalb des Schmelzpunkts vergleichsweise hoch ist. Da eine geringfügige Bewegung der Füllstoffteilchen in der Matrix möglich ist, wäre zu überprüfen in wie weit sich eine bestehende Anisotropie verringern läßt.

Charge	ungetempert		nach 4 Stunden bei 120 °C	
	ρ_{0_A} [Ωcm]	ρ_{0_B} [Ωcm]	ρ_{0_A} [Ωcm]	ρ_{0_B} [Ωcm]
1	1.12	0.84	0.82	0.64

Tab. 2: Vergleich des spezifischen Compoundwiderstands getemperter und ungetemperter Proben

Durch den Tempervorgang konnte zwar eine Verbesserung der Leitfähigkeit um ca. 25 % erreicht werden, jedoch bleibt die Anisotropie von ebenfalls ca. 25 % nahezu unverändert bestehen.

4.3 Schlussfolgerungen

Gemäß der im Abschnitt 4.1 aufgestellten Zielfunktionen für Compounds zur Verwendung zu Strombegrenzungszwecken wird die folgende Auswahl vorgenommen.

a. Matrixmaterial: HDPE

Um der Forderung nach einem reproduzierbaren Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur nachzukommen, sollte das Matrixmaterial schnell kristallisieren. PE erfüllt diese Forderung gut, da es sehr kleine Sphärolithe aufweist. Des weiteren sollte das Matrixmaterial zum Erreichen niedriger Werte für ρ_0 und S_{DURCH} eine hohe Kristallinität aufweisen. HDPE erfüllt diese Forderung besser als andere PE - Sorten. Der Schmelzpunkt des Matrixmaterials sollte - um eine gute Strombegrenzung zu erreichen - nicht all zu hoch liegen. Die Forderung nach einer guten Stromtragfähigkeit hingegen verlangt das Gegenteil. HDPE stellt hier mit seinem Schmelzpunkt von ca. 135 °C einen Kompromiss dar. Die molare Masse der Matrix ist für eine geringe Ausprägung des NTC-Effekts möglichst hoch zu wählen. Eine Beseitigung des NTC-Effekts ist mittels einer entsprechenden Vernetzung möglich. Da durch den hohen Füllgrad die Viskosität der Compoundschmelze ohnehin sehr hoch ist, muss trotz der stärkeren Ausbildung des NTC-Effekts auf ein niedrigmolekulares Material zurückgegriffen werden. Eine ständige Vernetzung des Materials zu Versuchszwecken scheidet aus Kostengründen aus.

b. Füllstoff: 40 Mas% Acetylenruß

Der Füllgrad ist zum Erreichen eines niedrigen ρ_0 - Werts und einer geringen Ausprägung des NTC-Effekts möglichst hoch zu wählen. Einem hohen Füllgrad steht die dann nur gering ausgeprägte Sprunghöhe sowie die mit dem Füllgrad zunehmend schwieriger werdende

Verarbeitung entgegen. Die mechanischen Compoundeigenschaften werden ebenfalls mit der Zunahme des Füllgrads schlechter. Somit wird für das in dieser Arbeit üblicherweise verwendete Material ein mittlerer Füllgrad von 40 Mas% gewählt. Die Forderung nach einer niedrigen Perkolationsschwelle führt zu kleinen Füllstoffteilchen mit einer hohen Struktur. Gleichzeitig wird eine hohe elektrische Leitfähigkeit gefordert. Um hier auch unter Kostengesichtspunkten eine vertretbare Lösung zu erreichen, wird auf Leitfähigkeitsruß zurückgegriffen. Um eine Schädigung der Rußstruktur durch die bei hohen Füllgraden auftretenden Scherenergien zu begrenzen, wird zu Gunsten von Acetylenrußen mit mittlerer Struktur auf Superleitfähigkeitsruße mit extrem hoher Struktur verzichtet. Ebenfalls gegen den Einsatz der Superleitfähigkeitsruße spricht die bei höheren Füllgraden nur sehr niedrige Sprunghöhe.

c. Herstellungsverfahren: Doppel-Z-Kneter + Presse

Da bei der Compoundherstellung weniger die Erzeugung einer gewissen Menge als vielmehr die Flexibilität bei der Realisierung verschiedenstartiger Mischungen im Vordergrund stand, wurde ein diskontinuierliches Herstellungsverfahren gewählt. So kam ein Doppel-Z-Kneter der Marke Brabender zum Einsatz. Um der Entstehung von Vorzugsrichtungen der Füllstoffteilchen im Probekörper entgegenzuwirken, wird der Probekörper mittels Verpressen aus dem Compoundgranulat hergestellt.

5 Elektrische Kontaktierung

5.1 Elektrischer Kontakt

Die Übergangsstelle zwischen zwei Leitern wird als elektrischer Kontakt bezeichnet. Typischerweise handelt es sich bei den Materialien der beiden Leiter um Metalle in fester Form. Die Beschreibung dieser Anordnung geht auf [41] zurück.

5.1.1 Metall-Metall-Kontakt

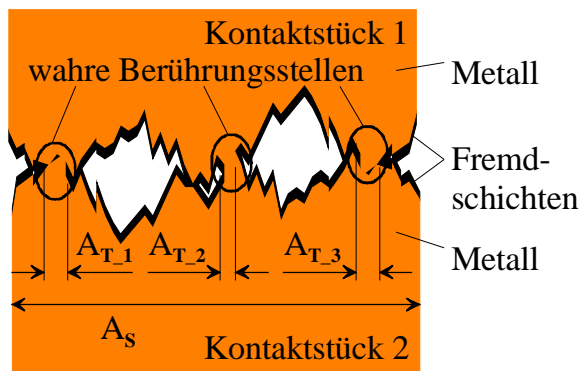


Abb. 30: Modell eines Metall-Metall-Kontakts

Eine aus zwei Metallstücken bestehende Kontaktanordnung ist durch das Vorhandensein von Rauheiten und Fremdschichtauflagen gekennzeichnet (Abb. 30). Die Oberflächenrauheiten können von dem Herstellungsprozess sowie von elektrischen und mechanischen Betriebsbeanspruchungen herrühren.

Die Folge ist, dass die wahre Berührungs-

fläche A_T der beiden Kontaktstücke nicht gleich der scheinbaren Kontaktfläche A_S ist. Die wahre Berührungsfläche ergibt sich aus der Summe der Flächen aller wahren Berührungsstellen bzw. Mikrokontaktstellen $A_T = \sum A_{T_i}$. Die scheinbare Kontaktfläche entspricht der Fläche, die die beiden Kontaktstücke im geschlossenen Zustand überdecken [1]. Der Anteil der wahren Berührungsfläche an der scheinbaren Kontaktfläche (A_T / A_S) liegt in der Größenordnung Promille. Der Übergang des Stroms von einem Kontaktstück in das andere kann nur in den Mikrokontaktstellen erfolgen.

Zusätzlich behindert wird der Stromübergang durch das Vorhandensein von Fremdschichten auf der Kontaktoberfläche, die durch die Reaktion des Kontaktmaterials mit Umgebungsmedien entstehen. Meistens handelt es sich bei den Fremdschichten um Metalloxyde die eine vergleichsweise hohe Härte (H_V : Cu: 48 ... 55, CuO / Cu₂O: 150 ... 200) aufweisen und demzufolge spröde sind. Beim Schließen der Kontaktstücke mit entsprechender Kontaktkraft und bei entsprechender Relativbewegung der Kontaktpartner ist es möglich, diese Fremdschichten zumindest partiell zu zerstören. Des weiteren lässt sich durch entsprechende Material- bzw. Umgebungsauswahl die Entstehung von Fremdschichten vermeiden bzw. auf solche Schichtdicken begrenzen, die von den Ladungsträgern durchtunnelt werden können.

Der sich ergebende Übergangswiderstand einer solchen Anordnung wird von dem Engwiderstand und dem Fremdschichtwiderstand bestimmt. Während sich der Fremdschichtwiderstand -

wie beschrieben - nahezu ausschalten lässt, ist dies mit dem Engewiderstand nicht möglich. Der Engewiderstand ergibt sich als Folge der Einschnürung der Stromfäden. Er kann bei Einführung einiger vereinfachender Randbedingungen nach [41] analytisch bestimmt werden. Eine exakte Bestimmung gestaltet sich bedeutend schwieriger und kann höchstens numerisch erfolgen. Der gesamte Engewiderstand einer Kontaktanordnung ist von der Leitfähigkeit der beiden Kontaktmaterialien, von der Fläche der wahren Berührungsstellen, von deren Anzahl sowie Verteilung [42] abhängig.

5.1.2 Metall-Compound-Kontakt

Die Gegebenheiten im Fall eines Kontakts zwischen einem Metall und einem Compound sind prinzipiell vergleichbar mit einem Metall-Metall-Kontakt, auch wenn einige für das Verhalten entscheidende Unterschiede vorhanden sind. Wie bereits in [37] vorgestellt wurde, ergibt sich das nachfolgend dargestellte schematische Bild (Abb. 31):

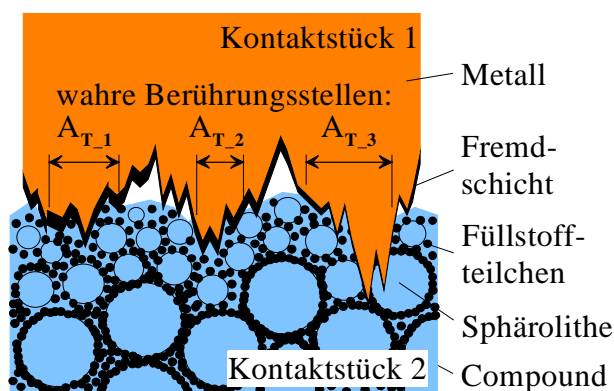


Abb. 31: Modell eines Metall-Compound-Kontakts

Das Compoundkontaktstück weist analog dem Metallkontaktstück eine durch den Herstellungsprozess sowie durch die elektrischen und mechanischen Betriebsbeanspruchungen herrührende Oberflächenrauheit auf. Eine Fremdschicht wie sie auf Metalloberflächen beobachtet werden kann, wird auf der Polymeroberfläche nicht

erwartet. Grund hierfür ist die größere Reaktionsträgheit der Kunststoffe verglichen mit Metall. Jedoch wird bei leitfähigen Polymercompounds im Volumen eine andere Struktur verzeichnet als in der Oberflächenschicht. Für die ausführliche Herleitung des Kontaktmodells wird auf Abschnitt 5.7 verwiesen. Die geringere Härte der Compoundmaterialien ist die Ursache dafür, dass bei einem Metall-Compound-Kontakt der Anteil der wahren Berührungsfläche an der scheinbaren Kontaktfläche größer als bei einem Metall-Metall-Kontakt ist. Die Härte der Compounds erhöht sich mit der Zunahme des Füllstoffgehalts, erreicht jedoch nicht die Werte der Metallelektroden.

Material	HV0,1
HDPE	7,1
HDPE + 40 Mas% Ruß	14,3
HDPE + 50 Mas% Ruß	18,4
Cu	48 ... 55
CuO, Cu ₂ O	150 ... 200 [50]

Tab. 3: Härtevergleich zwischen Compound- und Elektrodenmaterial sowie möglicher Fremdschichten

So wird es im Gegensatz zu einem Metall-Metall-Kontakt bei einem Metall-Compound-Kontakt weniger zur plastischen Deformation der Oberflächenrauheiten des Metalls sondern viel mehr zu einer solchen des Compounds kommen. Die Spitzen des „Rauheitsgebirges“ des Metalls dringen in das Compound ein und kommen dabei mit den leitfähigen Füllstoffteilchen in Kontakt. Hierbei ist zu beachten, dass nicht an jeder Stelle, bei der das Metall mit dem Compound im Eingriff steht, ein Ladungsübergang erfolgen kann. Der Ladungsübergang kann nur an den Stellen erfolgen, an denen Metall mit einem Füllstoffteilchen in Kontakt kommt, welches Teil einer durch das Compound führenden Füllstoffteilchenbahn ist. Steht in einer Mikroberührungsstelle dem Metall der Elektrode amorpher Kunststoff oder ein Sphärolith gegenüber, kann kein Ladungsübergang erfolgen.

Wie ausgeführt, ist es im Fall eines Metall-Metall-Kontaktsystems möglich, bei entsprechender Kontaktkraft, Fremdschichten auf der Metalloberfläche zu zerstören. Bei Metall-Compound-Kontakten wird zwar die geringe Härte des Compounds einen höheren Wert für A_T/A_S ermöglichen, jedoch ist es hier nur noch schwer möglich, Fremdschichten auf der Metalloberfläche zu zerstören. Deswegen sollte bei der Materialauswahl für die Metallelektrode darauf geachtet werden, dass eine Ausbildung von Fremdschichten so weit wie möglich vermieden wird. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass als Ursache der Fremdschichtbildung nicht nur Luftsauerstoff sondern auch die Zersetzungsprodukte des Compounds in Frage kommen.

5.2 Abschätzung der wahren Berührungsfläche

Bei plastischer Verformung der Kontaktfläche besteht nach [1] der folgende Zusammenhang

zwischen wahrer Berührungsfläche und Kontaktkraft:
$$A_T = \frac{F_K}{(0,5 \dots 0,7) \cdot H_B}.$$

Zur Abschätzung der wahren Berührungsfläche aus dem messbaren Compoundwiderstand soll die

folgende makroskopische Betrachtung angestellt werden (bereits in [37] vorgestellt): Unter Annahme eines isotropen Materials wird der wahre spezifische Compoundwiderstand ρ_T entsprechend Anhang 4 bestimmt. Der am kontaktierten Compound messbare Compoundwiderstand R wird entsprechend Anhang 2 ermittelt. Mit der scheinbaren Elektrodenfläche A_S und der Compounddicke d wird der scheinbare spezifische Compoundwiderstand wie folgt definiert: $\rho_s = R \frac{A_S}{d}$.

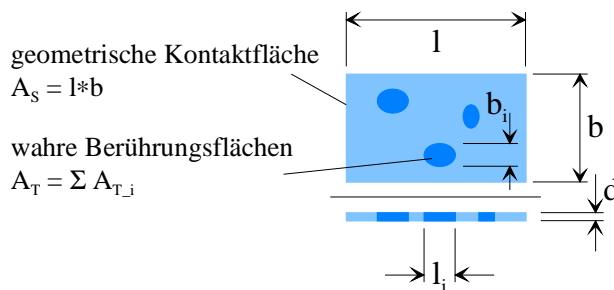


Abb. 32: Wahre Berührungsflächen und scheinbare Kontaktfläche

Wird angenommen, dass die Abmessungen einer wahren Berührungsfläche (b_i und l_i) (Abb. 32) bedeutend größer als die Compounddicke d sind, kann das elektrische Strömungsfeld im Compoundinneren als homogen betrachtet werden. (Da diese Annahme den gegebenen Verhältnissen

nicht entgegensteht wird in Abschnitt 5.3 gezeigt.) Es werden also - in Näherung - nur die Bereiche im Compound vom Strom durchflossen, die sich unmittelbar unterhalb der wahren Berührungsflächen befinden. Somit lässt sich die folgende Beziehung aufstellen: $\frac{A_T}{A_S} = \frac{\rho_T}{\rho_s}$.

Diese Herangehensweise stellt eine starke Vereinfachung der gegebenen Verhältnisse im Bereich eines Metall-Compound-Kontakts dar. Jedoch wird damit die Grundlage zur Definition des Gütefaktors der Kontaktierung (siehe Abschnitt 5.8) geschaffen, welcher eine unter praktischen Gesichtspunkten einfach zu handhabende und aussagekräftige Größe darstellt.

5.3 Mikroskopische Kontaktrauheiten, makroskopische Kontaktunebenheiten

Entsprechend [1] gilt für plastische Verformung der Oberflächenrauheiten, dass die wahre Berührungsfläche der Kontaktkraft proportional ist: $A_T \sim F_K$. Des weiteren ergibt sich der

Kontaktdruck zu: $p = \frac{F_K}{A_S}$. Wird nun $p = \text{konstant}$ gewählt, so müsste (unabhängig von A_S und

für $\rho_T = \text{konstant}$) ebenfalls $\rho_s = \text{konstant}$ sein. Zur Überprüfung dieses Zusammenhangs wurde wiederum der in Anhang 2 dargestellte Aufbau genutzt. Diesmal wurde jedoch nicht $R(T)$ sondern $R(F)$ bei $T = 23^\circ\text{C}$ bestimmt.

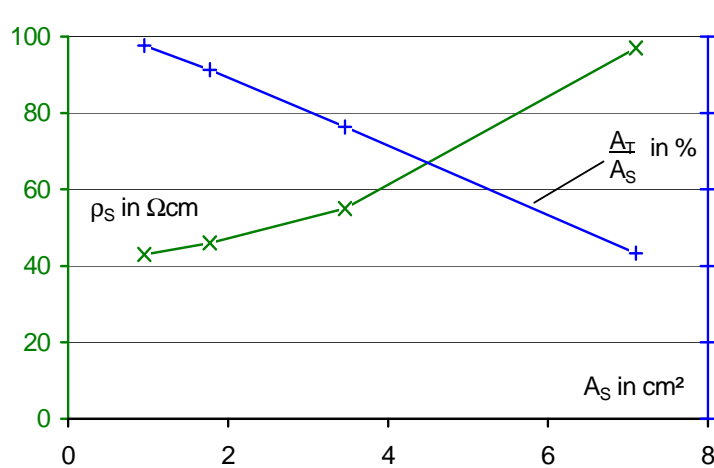


Abb. 33: Einfluss der Größe von A_S auf das Verhältnis A_T/A_S

Der Füllstoffgehalt der HDPE-Proben beträgt 35 Mas%. Entsprechend Anhang 4 wird $\rho_T = 2,1 \Omega\text{cm}$ ermittelt. Trotz des konstanten Kontaktdrucks von $p = 19 \text{ N/cm}^2$ wird eine Zunahme des scheinbaren Compoundwiderstands bzw. eine Abnahme des Anteils der wahren Berührungsfläche an der scheinbaren Kontakt-

fläche mit der Zunahme der scheinbaren Kontaktfläche beobachtet (Abb. 33). Um die Ursache für dieses Verhalten zu erschließen, wird die Oberflächentopologie der Elektroden betrachtet. Analog zu den Ausführungen in [1] über die Gestalt der wahren Berührungsstellen sowie die Verteilung dieser über die scheinbare Kontaktfläche wird es als sinnvoll erachtet, die Betrachtung in verschiedenen Größendimensionen vorzunehmen. Dabei soll unterschieden werden zwischen:

- Makroskopischer Betrachtung: betrachtet wird der gesamte Kontakt bzw. ein größerer Teil davon (mm - Bereich: Kontaktunebenheiten) sowie
- Mikroskopischer Betrachtung: betrachtet wird nur ein kleiner Ausschnitt eines Kontakts (betrachteter Bereich: μm : Rauheiten).

a. Mikroskopische Betrachtung

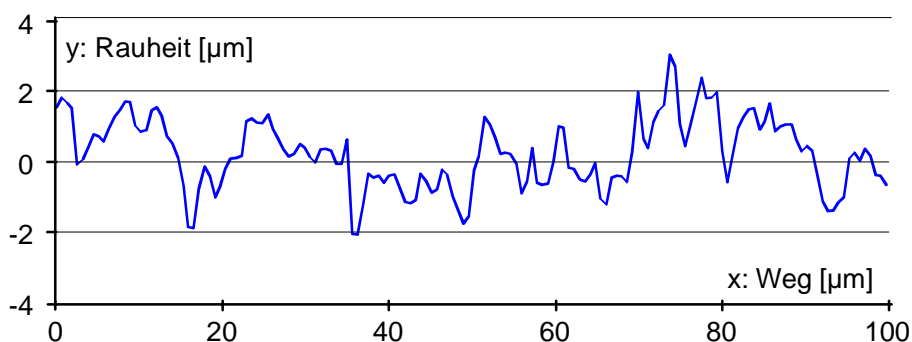


Abb. 34: Mikroskopische Oberflächenrauheiten

Die Abb. 34 zeigt einen Ausschnitt aus einem Oberflächenscan einer Elektrode. Für die festgestellten Rauheiten in dieser Größenordnung kann von plastischer Verformung ausgegangen werden. Somit sind mikroskopische Rauheiten für die Qualität der Kontaktierung von untergeordneter Bedeutung.

b. Makroskopische Betrachtung

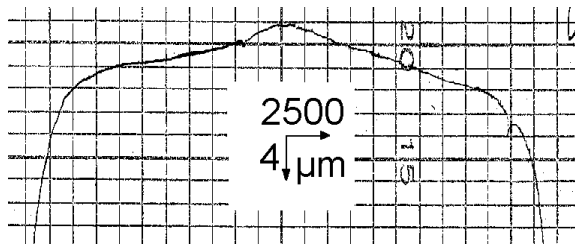


Abb. 35: Makroskopische Rauheiten:
Plangeschliffene Elektrode

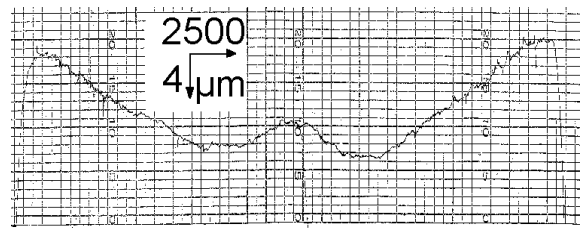


Abb. 36: Makroskopische Rauheiten:
Plangedrehte Elektrode

Die Bilder zeigen die Oberflächen zweier Kupferelektroden jeweils über den gesamten Durchmesser von 30 mm. Um die von der Bearbeitung herrührende typische Oberflächenstruktur sichtbar zu machen wird für den y-Maßstab ein 625 mal kleinerer Wert als für den x-Maßstab gewählt. Die Oberfläche der links abgebildeten Elektrode wurde plangeschliffen (Abb. 35), die auf der rechten Seite hingegen plangedreht (Abb. 36). Die makroskopischen Rauheiten haben ihre Ursache im Verdrücken des Bearbeitungswerkzeugs (Schleifscheibe, Drehmeißel) in Abhängigkeit der bei der Bearbeitung wirkenden Kräfte. Bei der Verwendung dieser Elektroden besitzen die wahren Berührungsstellen das folgende Aussehen (Abb. 37).

plangeschliffene Elektrode

plangedrehte Elektrode

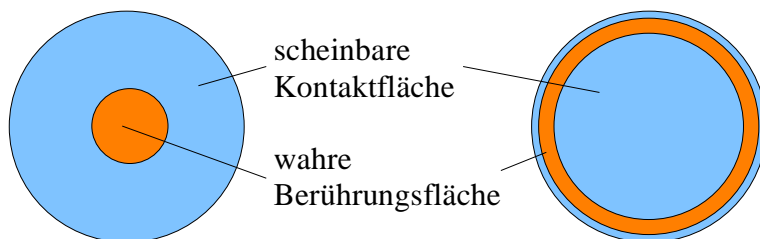


Abb. 37: Typisches Aussehen und Lage der wahren Berührungsfläche

Bei einer derartigen Gestalt der Oberfläche kann nicht mehr von einer rein plastischen Verformung der Rauheiten ausgegangen werden. Somit verliert $A_T \sim F_K$ seine Gültigkeit.

Die Größe der wahren Berührungsstellen steigt nicht mehr proportional mit der Kontaktkraft an. Somit kommt es mit der Zunahme der scheinbaren Kontaktfläche nicht in gleichem Maße zu einer Zunahme der wahren Berührungsfläche. Dies bedeutet, dass der Anteil der wahren Berührungsfläche an der scheinbaren Kontaktfläche mit größer werdender scheinbarer Kontaktfläche abnimmt (Abb. 33). Den makroskopischen Rauheiten fällt somit für die Qualität der Kontaktierung eine große Bedeutung zu.

5.4 Auswirkungen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der beiden Kontaktmaterialien

Bei Temperaturerhöhung ist der Compoundwiderstand im Durchgangs- und Sprungbereich von einem positiven sowie im Sperrbereich von einem negativem Temperaturkoeffizienten geprägt.

Unter bestimmten Voraussetzungen (Vernetzung) ist auch der Sperrbereich von einem positiven Temperaturkoeffizienten des Widerstands gekennzeichnet. Bei Temperaturverringern ist das umgekehrte Verhalten zu beobachten. In verschiedenen Publikationen ([7], [21] und [47]) wurde ein diesem Verhalten zum Teil entgegenstehendes geschildert. So beobachtete man beim Aufheizvorgang im Durchgangsbereich zum Teil negative Temperaturkoeffizienten. Des weiteren berichtet man von einer schlechten Reversibilität der $R(T)$ -Abhängigkeit. Tendenziell wird hierbei von einer Verschlechterung des Durchgangswiderstands von einem zum nächsten Temperaturzyklus gesprochen. Verantwortlich gemacht werden dafür Instabilitäten in der Compoundstruktur. Man vermutet, dass in Folge der aufeinander folgenden Aufschmelz- und Erstarrungsprozesse die Rußteilchen nicht wieder an ihre ursprünglichen Plätze kommen und somit eine Struktur entsteht, die eine schlechtere Leitfähigkeit aufweist [7]. In diesem Zusammenhang stellt sich jedoch die Frage: Wieso soll sich gerade beim ersten Wärmezyklus (entspricht dem Herstellungsprozess) eine solch vorteilhafte Struktur einstellen, die in der Folge weiterer Wärmezyklen nicht aufrecht erhalten werden kann?

Bei den Untersuchungen zur Materialauswahl wurden unter Verwendung der im Anhang 2 dargestellten Versuchseinrichtung zum Teil vergleichbare Beobachtungen gemacht (Abb. 38).

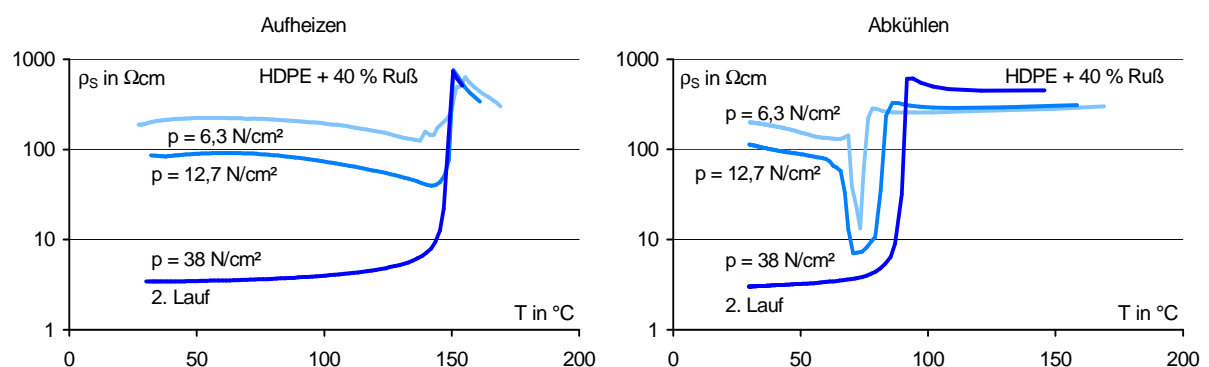


Abb. 38: Abweichungen zwischen messbaren und erwarteten $R(T)$ in Abhängigkeit vom Kontaktdruck

Das so beobachtete vom „Erwarteten“ (entsprechend den Abschnitten 3.9 und 3.10) abweichende Verhalten trat um so wahrscheinlicher auf bzw. wurde um so ausgeprägter beobachtet

- je höher der Füllgrad ist,
- je dicker die Probe und
- je niedriger die Kontaktkraft gewählt wurde.

Der in Abbildung 38 dargestellte 2. Lauf mit einem Kontaktdruck von 38 N/cm² entspricht in seiner Art dem „Erwarteten“.

Gerade das verstärkte Auftreten des vom „Erwarteten“ abweichenden Verhaltens im Zusammenhang mit höheren Füllgraden läßt sich nicht mit den in [7] geäußerten Vermutungen in Einklang

bringen. So bedingen höhere Füllgrade höhere Schmelzviskositäten. Höhere Viskositäten behindern jedoch eher Umlagerungsprozesse als sie diese fördern würden. Vielmehr weist der Zusammenhang mit der Kontaktkraft auf eine andere Ursache für dieses Verhalten hin. Es entsteht der Verdacht, dass das in der Literatur dargestellte dem Compound zugeschriebene Verhalten eine Überlagerung aus zwei verschiedenen Prozessen darstellt:

- zum Einen dem Verhalten des Compounds selber und
- zum Anderen dem Verhalten an der Grenzschicht zwischen Compound und Metallelektrode.

Nachfolgend soll ein Modell vorgestellt werden, mit dem das Verhalten an der Grenzschicht der beiden Kontaktpartner beschrieben werden kann und mit dem die Messwerte erklärt werden können (Abb. 39).

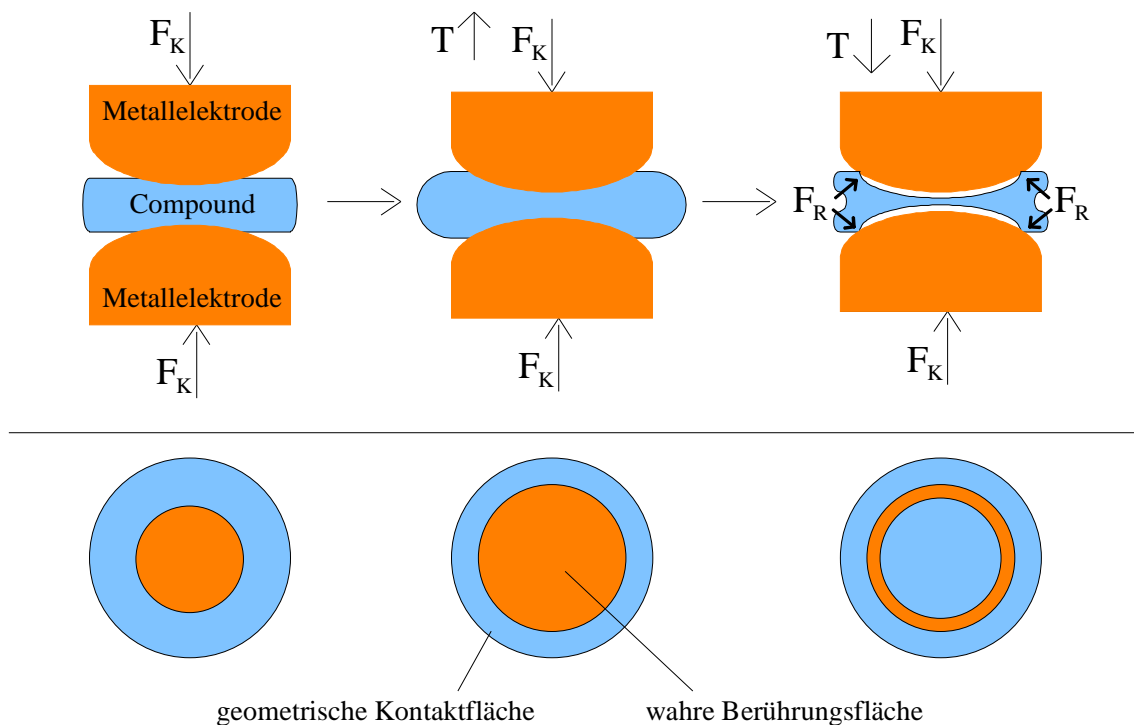


Abb. 39: Thermo-mechanisches Wechselspiel zwischen Compound und Elektrode

Nach dem Aufsetzen der Elektroden wird zunächst ein Vielfaches des wahren Compoundwiderstands gemessen. Die wahre Berührungsfläche ist entsprechend klein. Die Größe dieser Fläche hängt von der aufgewendeten Kontaktkraft ab. Erhöht man die Temperatur führt dies zu einer Verringerung der Härte des Compounds. Wegen der auf die Anordnung wirkenden Kontaktkraft kommt es zum Einsinken der Metallelektroden in das Compound und damit zu einer Zunahme der wahren Berührungsfläche. Diese Zunahme schreitet in einem solchen Maße fort, dass trotz des Anstiegs des wahren Compoundwiderstands ein Absinken des messbaren Widerstands registriert wird (Abb. 38: Aufheizvorgang, Messungen bei 6,3 N/cm² und 12,7 N/cm²). Mit der Annäherung der Temperatur an den Sprungbereich nimmt der Temperatur-

koeffizient des Widerstands beträchtlich zu. So wird das Absinken des Widerstands in Folge der Zunahme der wahren Berührungsfläche ausgeglichen. Der Widerstand erreicht hier ein Minimum. Im weiteren Verlauf wird der vom PTC-Effekt herrührende starke Widerstandsanstieg durchschritten. Im sich daran anschließenden Sperrbereich kommt es in Folge des NTC-Effekts zum erneuten Absinken des Widerstands. Nach dem Aufschmelzen des Compounds, welches von einem drastischen Rückgang der Härte begleitet ist, wird der Anteil der wahren Berührungsfläche an der scheinbaren Kontaktfläche Werte nahe 100 % erreichen. In Folge der nach wie vor wirkenden Kraft auf dem System kommt es zum seitlichen Austritt von Compoundmaterial zwischen den Metallelektroden. Beginnt man nun die Temperatur wieder abzusenken, ändert sich bis zum Erstarrungspunkt an den Verhältnissen wenig. Im Zuge der Rekristallisation wird erwartungsgemäß wieder das niedrige Widerstandsniveau des Durchgangsbereichs erreicht. Jedoch wird bei weiter sinkender Temperatur wenig später ein erneuter abrupter Widerstandsanstieg beobachtet. Ursache für dieses Verhalten ist die große Differenz der Ausdehnungskoeffizienten der beiden aneinander grenzenden Materialien (Abb. 40). Der thermische Ausdehnungskoeffizient von Kupfer nimmt mit ansteigender Temperatur geringfügig zu. In [51] werden für den Temperaturbereich 0 ... 100 °C ein mittlerer Wert von $16.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und für 0 ... 400 °C einer von $17.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ angegeben. Demgegenüber liegt der Ausdehnungskoeffizient des Compounds in Abhängigkeit von der Temperatur 1 ... 2 Größenordnungen über diesem Wert. Die Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten des Compounds erfolgte mittels eines Flüssigkeitsdilatometers in Quecksilber.

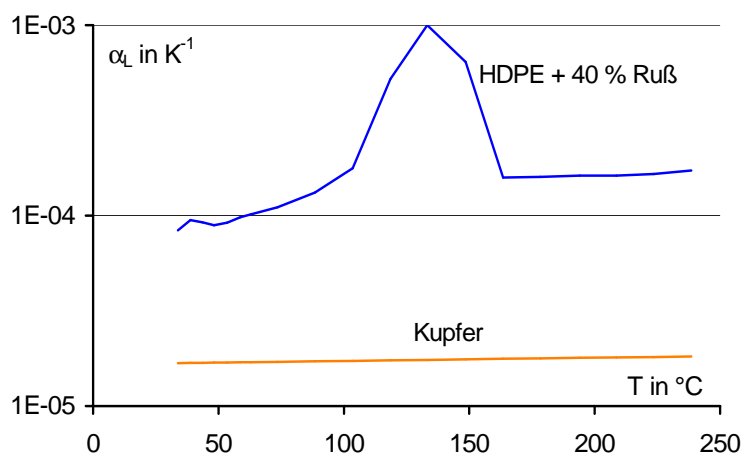


Abb. 40: Vergleich der Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Compound

Die große Differenz der beiden Ausdehnungskoeffizienten führt zu einer viel stärkeren Kontraktion des Compounds verglichen mit dem Metall. Im Zusammenhang mit den makroskopischen Rauheiten hat dies Kraftwirkungen (F_R) mit erheblicher radialer Komponente zur Folge. Da es sich im Fall der Compounds um teilkristalline

Materialien handelt, ist in Reaktion auf diese Kraftwirkungen neben einer Dehnung des Materials auch mit einer Relaxation zu rechnen. Der Vorgang läuft jedoch zu schnell ab, so dass es zu einem regelrechten Aufreißen der Kontaktierung kommt. Das Aufreißen hat zur Folge, dass die

Metallelektroden zu größeren Bereichen des Compounds den Kontakt verlieren. Dies äußert sich in dem beobachtbaren Widerstandsanstieg. Nachfolgend wird dieser Vorgang auch als thermo-mechanischer Stress bezeichnet.

Mit der Modellvorstellung des thermo-mechanischen Stresses lassen sich die in den Messungen und in der Literatur beobachteten Abweichungen vom „Erwarteten“ erklären. Auch die Verschlechterung des scheinbaren Compoundwiderstands von Temperaturlauf zu Temperaturlauf ist nun nachvollziehbar. Durch das wiederholte Abreißen der Kontaktierung bei jeder Abkühlung kommt es zur sich wiederholenden Exposition größerer Bereiche der Metallelektrode mit der warmen Umgebungsluft im Wärmeofen. Dies führt insbesondere bei reaktionsfreudigen Werkstoffen wie Kupfer zu einer zunehmenden Fremdschichtausbildung. So wird zwar im Zuge eines jeden Temperaturzykluses das beschriebene Verhalten durchlaufen, jedoch geschieht dieses von Fall zu Fall auf einem höherem Widerstandsniveau.

5.5 Forderungen an den Metall-Compound-Kontakt

Aus den Ausführungen der vorangestellten Abschnitte sind die folgenden drei Forderungen an ein Metall-Compound-Kontaktsystem zu stellen:

1. Die Leitfähigkeit der Metalle liegt in der Größenordnung $\rho_{\text{METALL}} = 10^{-4} \dots 10^{-6} \Omega\text{cm}$ die der Compounds jedoch nur bei $\rho_{\text{COMPOUND}} \approx 1 \Omega\text{cm}$. Der Engewiderstand der Kontaktierung ist das Ergebnis der Einschnürung der Feldlinien des Strömungsfeldes in der Kontaktzone. Des weiteren weist der Engewiderstand eine Proportionalität zum spezifischen Widerstand der Kontaktpartner auf: $R_E \sim \rho$. Da der spezifische Widerstand des Compounds einige Größenordnungen über dem der Metalle liegt, ein Anstieg des Engewiderstands in der gleichen Größenordnung jedoch vermieden werden soll, erhebt sich die Forderung das Verhältnis von A_T / A_S über die bei Metall-Metall-Kontakten beobachtbare Größenordnung hinaus zu erhöhen.
 2. Aus dem vergleichsweise hohen Compoundwiderstand folgt die Notwendigkeit nach sehr großen Kontaktflächen (einige 10 cm^2). Eine Vergrößerung der Kontaktfläche ist jedoch nur sinnvoll, wenn dadurch das Verhältnis A_T / A_S nicht negativ beeinflusst wird.
 3. Das Kontaktsystem muß den durch Temperaturwechselbeanspruchung hervorgerufenen thermo-mechanischen Stress beherrschen können. Der $R(T)$ -Zusammenhang muß dem „Erwarteten“ gemäß den Abschnitten 3.9 und 3.10 entsprechen, sowie reproduzierbar sein.
- Um diese Forderungen zu erfüllen, ist es notwendig die Verwendung starrer Kontaktstücke zugunsten flexibler Elektroden aufzugeben. Unter flexiblen Elektroden werden dabei

Leitersysteme (z.B. Metallbleche oder -folien) verstanden, die sich unter dem betriebsmäßig auf dem Kontaktsystem wirkenden Druck ausreichend verformen können. Der auf das System wirkende Druck soll dabei über die gesamte Elektrodenfläche gleichmäßig angreifen. Dies beides ist notwendig damit:

- die makroskopischen Oberflächenrauheiten von Metall- und Kunststoff einander angeglichen werden können und
- Veränderungen der Oberflächentopologie des Compounds in Folge
 - * thermischer Ausdehnungsdifferenzen zwischen Metall und Compound sowie
 - * Materialverlust in Folge des Materialabbrands bei Kurzschlussbeanspruchung ausgeglichen werden können und das Verhältnis A_T / A_S konstant bleibt.

5.6 Kraftkontaktierung

Eine Möglichkeit die im Abschnitt 5.5 umrissene Kontaktierung praktisch auszuführen, stellt die im Nachfolgenden so genannte Kraftkontaktierung (Anhang 6) dar. Sie wird bei den in dieser Arbeit vorgestellten Hochstrom-Versuchen verwendet. Bei der Kraftkontaktierung kommen als Elektroden weichgeglühte Kupferbleche mit einer Dicke von 1 mm oder noch besser 0,5 mm zum Einsatz. Flankiert werden diese von Gummilagen über die mittels Stahlplatten und einen Schraubstock der notwendige Kontaktdruck aufgebracht wird. Der Kontaktdruck soll dabei unabhängig von den makroskopischen Oberflächenrauheiten homogen über die gesamte Compoundfläche verteilt angreifen.

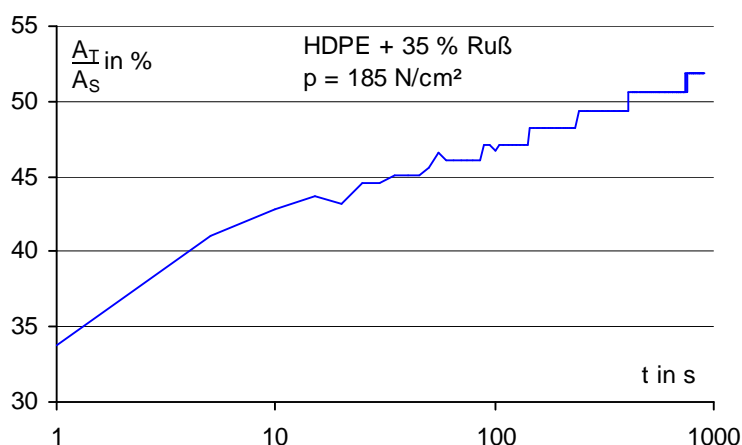


Abb. 41: Zeitabhängigkeit von A_T / A_S bei Raumtemperatur

Auf Grund der teilkristallinen Struktur weist der verwendete Matrixwerkstoff HDPE viskoelastisches Verhalten auf. A_T / A_S ist somit eine Funktion der Zeit (Abb. 41). Dieses Verhalten ist um so ausgeprägter je höher der Druck bzw. je geringer die Härte (und damit der Füllgrad) des untersuchten Compounds ist. Für die

nachfolgend dargestellten Untersuchungen wird deswegen zwischen dem Aufbringen der Kontaktkraft bis zur Messwertgewinnung eine Pause von ca. 10 s eingelegt.

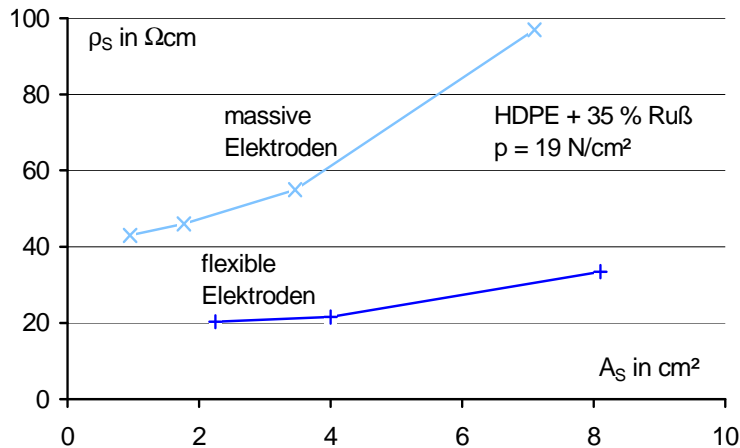


Abb. 42: Vergleich der mit massiven und flexiblen Elektroden erreichten scheinbaren Compoundwiderstände

1. niedrigere scheinbare Compoundwiderstände erzielt werden und damit der Anteil der wahren Berührungsfläche an der scheinbaren Kontaktfläche zugenommen hat und
2. die Abhängigkeit des Verhältnisses A_T/A_S von A_S weniger stark ausgeprägt ist.

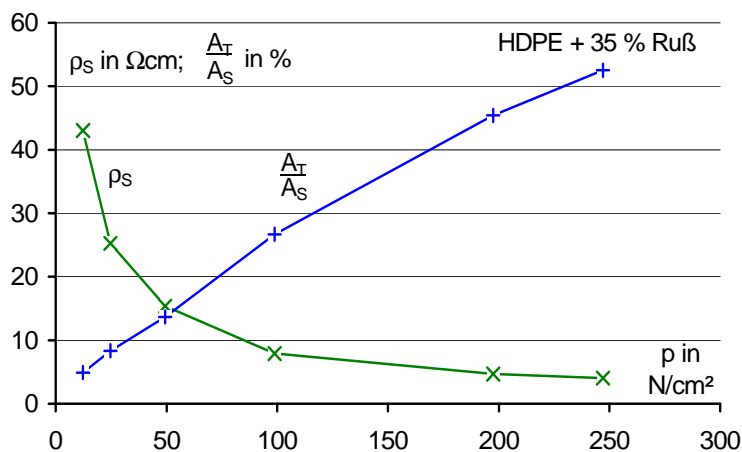


Abb. 43: Abhängigkeit des scheinbaren Compoundwiderstands vom Kontaktdruck

Oberflächenrauheiten der Metallelektrode in das Compound und damit zur Zunahme des Anteils von A_T an A_S .

Vergleicht man die mit massiven sowie flexiblen Metallelektroden erreichten scheinbaren Compoundwiderstände bei gleichem Kontaktdruck (Abb. 42) kann festgestellt werden, dass bei flexiblen Elektroden:

In der Abbildung 43 ist die Abhängigkeit des scheinbaren Compoundwiderstands sowie des Anteils der wahren Berührungsfläche an der scheinbaren Kontaktfläche A_T/A_S vom aufgewendeten Kontaktdruck dargestellt.

Erwartungsgemäß kommt es bei einem höheren Kontaktdruck zu einem tieferen Einsinken der

5.7 Beschreibung des Kontaktsystems

Nachdem im Abschnitt 5.1.2 ein Überblick über den Metall-Compound-Kontakt gegeben wurde, soll im nachfolgenden mit der Ausarbeitung eines maßstäblichen Modells die Grundlage für die Herleitung der zur Strombegrenzung führenden Wirkungen geschaffen werden. Die Betrachtung erfolgt analog der Herangehensweise bei der Untersuchung der Rauheiten in zwei unterschiedlichen Dimensionen - der makroskopischen und der mikroskopischen Sichtweise. Die makroskopische Betrachtung setzt sich in erster Linie mit dem Zustandekommen der wahren

Berührungsfläche auseinander. Demgegenüber betrachtet die mikroskopische Sicht die strukturellen Gegebenheiten des Kontaktsystems.

5.7.1 Makroskopisches Kontaktmodell

Gegenstand der makroskopischen Betrachtung ist die Herausbildung der wahren Berührungsfläche in Folge der Verformung der beiden Kontaktpartner unter dem Einfluss der Kontaktkraft. Wegen der über die scheinbaren Kontaktfläche gleichmäßig angreifenden Kontaktkraft kommt es zur Angleichung der makroskopischen Oberflächenrauheiten (überwiegend elastische Verformung) sowie zu dem Eindringen der mikroskopischen Rauheiten des Metalls in den Kunststoff (überwiegend plastische Verformung). Ursache für das einseitige Eindringen des Metalls in den Kunststoff ist der Härteunterschied zwischen den Kontaktpartnern. Zur Veranschaulichung dieses Verhaltens soll das nachfolgende Beispiel dienen.

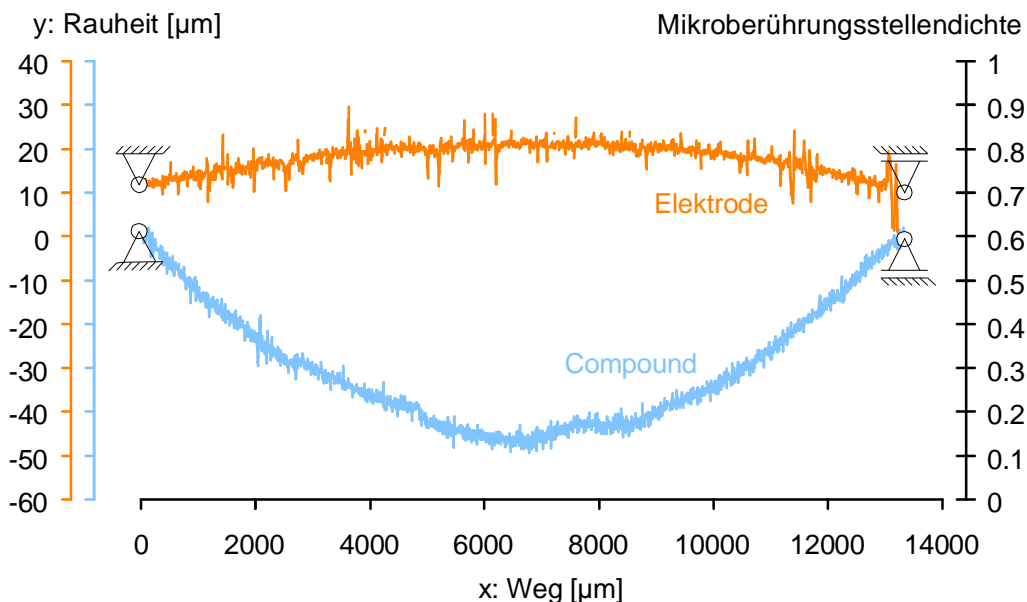


Abb. 44: Lage der Oberflächenrauheiten der beiden Kontaktpartner ohne Kontaktkraft

Dargestellt sind die mit einem Profilometer UBC 14 von UBM abgerasterten Oberflächen einer Kupferelektrode und eines Compoundplättchens sowie die Mikroberührungsstellendichte (Abb. 44). Diese ergibt sich indem man Anzahl (i) und Größe der Mikroberührungsstellen (A_{μ}) auf eine Flächeneinheit (A) bezieht:

$$\frac{\sum_i A_{\mu_i}}{A} \quad \begin{array}{l} A_{\mu_i} \text{ .. Fläche der } i\text{-ten Mikroberührungsstelle} \\ A \text{ .. betrachtete Flächeneinheit} \end{array}$$

Um die makroskopischen Rauheiten der beiden Kontaktpartner sichtbar zu machen, wird für die y-Koordinate eine um den Faktor 80 höhere Auflösung - verglichen zur x-Koordinate - gewählt.

Zur Vermeidung von Kurzschlüssen zwischen den Elektroden wird der Rand des Compounds bei der Vorbereitung für eine Hochstrombelastung mit Isolierband abgeklebt (siehe Anhang 6). Um dieser Gegebenheit Rechnung zu tragen, werden die in der Abbildung 44 dargestellten Einspannungen eingeführt. Nachfolgend dargestellt (Abb. 45) ist eine Simulation zur Verformung der beiden Kontaktpartner unter der Wirkung einer Flächenlast p (entspricht dem Kontaktdruck). Ermittelt werden die Stellen wo die Elektrode mit dem Compound in Berührung kommt.

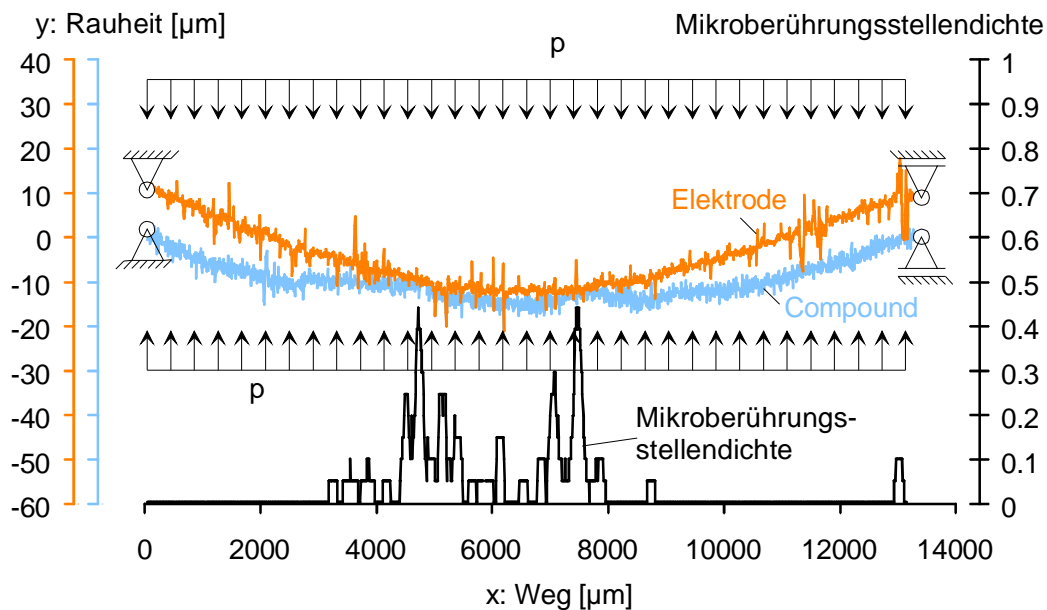


Abb. 45: In Folge des Kontaktdrucks: Herausbildung von Gebieten verschieden hoher Mikroberührungsstellendichte hervorgerufen durch die makroskopischen Oberflächenrauheiten

In der Mitte zwischen den Einspannungen wird die größte Verformung beobachtet. Es kommt zur Berührung der beiden Kontaktpartner, was die Herausbildung von Mikroberührungsstellen zur Folge hat. Bei einer weiteren Zunahme der Kontaktkraft erfolgt hier nur noch eine geringe Zunahme der Durchbiegung. Das Aufsitzen der mikroskopischen Rauheiten auf ihren Gegenstücken verhindert eine weitere ungehinderte Durchbiegung. Die weitere Durchbiegung wird somit vornehmlich in Gebieten erfolgen, in denen es noch nicht zur Herausbildung von Mikroberührungsstellen gekommen ist. In der Folge werden diese jetzt bevorzugt dort entstehen. Gleichzeitig kommt es in den Gebieten, die bereits über Mikroberührungsstellen verfügen, zum weiteren Eindringen der mikroskopischen Rauheiten des Metalls in das Compound. Dies führt zu einer Zunahme der Anzahl und der Größe der Mikroberührungsstellen. In der Endkonsequenz kommt es zur Angleichung der makroskopischen Rauheiten der beiden Kontaktpartner. Wie hoch die Mikroberührungsstellendichte an einer bestimmten Stelle der scheinbaren Kontaktfläche ist, ist abhängig von den makroskopischen Rauheiten sowie von der Verformung der beiden Kontaktpartner an der betrachteten Stelle.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass die makroskopischen Rauheiten zur Herausbildung von Gebieten mit höherer und niedrigerer Berührungsstellendichte führen.

5.7.2 Mikroskopisches Kontaktmodell

Das mikroskopische Kontaktmodell betrachtet im Gegensatz zur makroskopischen Sichtweise nicht das Zustandekommen der Mikroberührungsstellen, sondern die Material-strukturellen-Gegebenheiten im Bereich einer Mikroberührungsstelle. Um das Verhaltens des kontaktierten Compounds bei Hochstrombelastung ableiten zu können, wird für die Gegebenheiten im Bereich einer Mikroberührungsstelle ein maßstäbliches Modell entwickelt (Abb. 46). Dem Modell liegt das für die Hochstromuntersuchungen verwendete HDPE + 40 Mas% Acetylenruß zu Grunde. Zur Aufstellung des Modells wird der Übergang zwischen Metallelektrode und Compound in 4 Bereiche eingeteilt.

1. der zentrale Bereich des Metalls,
2. der oberflächennahe Bereich des Metalls,
3. der oberflächennahe Bereich des Compounds und
4. der zentrale Bereich des Compounds.

zu 1.: Zentraler Bereich des Metalls

Von Korngrenzen sowie sonstigen Defekten im Metallgitter abgesehen, kann dieser Bereich als homogenes und isotropes, leitfähiges Material betrachtet werden.

zu 2.: Oberflächennaher Bereich des Metalls

Dieser Bereich ist durch das Vorhandensein von mikroskopischen sowie makroskopischen Oberflächenrauheiten gekennzeichnet. Deshalb ist die wahre Berührungsfläche kleiner als die scheinbare Kontaktfläche. Zur Quantifizierung der Rauheiten der als Elektroden verwendeten Kupferbleche wurden die Oberflächen mit dem bereits erwähnten Profilmeter UBC 14 von UBM abgerastert. Des weiteren kann es auf der Metalloberfläche zur Ausbildung von - im allgemeinen schlecht leitfähigen - Fremdschichten kommen. Wie im Abschnitt 5.1.2 dargestellt, ist bei einem Metall-Compound-Kontakt darauf zu achten, dass es nicht oder nur in sehr begrenztem Umfang zur Ausbildung von Fremdschichten kommt.

zu 4.: Zentraler Bereich des Compounds

Das im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Compoundmaterial setzt sich aus einer nichtleitfähigen teilkristallinen Matrix (HDPE) und einem leitfähigen Füllstoff (Leitfähigkeitsruß) zusammen.

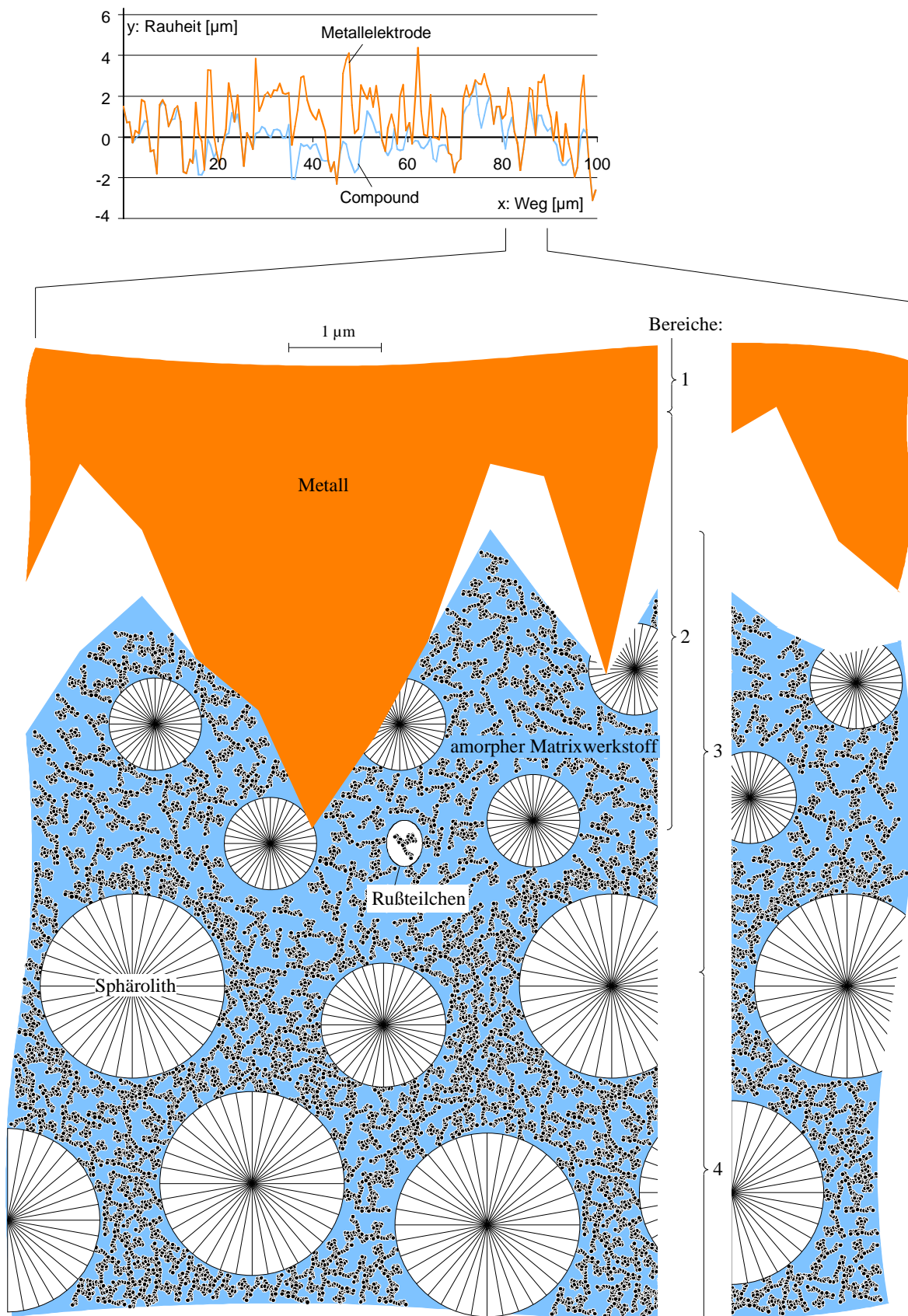


Abb. 46: Mikroskopisches Kontaktmodell

Die Herleitung der Struktur für das Beispielcompound HDPE + 40 Mas% Ruß erfolgt für die zentralen Bereiche an Hand der nachfolgend dargestellten Kenngrößen:

- Der Kristallinitätsgrad des verwendeten HDPE liegt unabhängig von der Höhe der Rußfüllung bei ca. 71 % (siehe Anhang 7-2).
- Die Größe der PE-Sphärolithe beträgt 2 ... 4 µm.
- Die Dichte des verwendeten HDPE liegt bei 0,96 g/cm³ und die des Compounds (HDPE + 40 Mas% Ruß) bei 1,18 g/cm³. Hieraus lässt sich mittels einer Verhältnisgleichung die scheinbare Dichte des Rußes im Compound zu 1,51 g/cm³ ermitteln.

Mit $\frac{V_{\text{RUß}}}{V_{\text{HDPE}}} = \frac{D_{\text{HDPE}}}{D_{\text{RUß}}} \cdot \frac{m_{\text{RUß}}}{m_{\text{HDPE}}}$ folgt aus $\frac{m_{\text{RUß}}}{m_{\text{HDPE}}} = \frac{40}{60}$ für $\frac{V_{\text{RUß}}}{V_{\text{HDPE}}} = 0,42$. Bei einer Kristallinität

von 71 % ergibt sich $V_{\text{RUß}} / V_{\text{HDPE_KRISTALLIN}} / V_{\text{HDPE_AMORPH}} = 30 / 50 / 20$. Somit muß bei einer Bildfläche von 10000 Flächeneinheiten die Größe der Sphärolithe 5000 Flächeneinheiten betragen. Die Rußteilchen beanspruchen eine Fläche von 3000 Flächeneinheiten was 219 Modellrußteilchen (siehe Anhang 7-1) entspricht. Die restlichen 2000 Flächeneinheiten entfallen auf den amorphen Anteil des Matrixmaterials (Abb. 47).

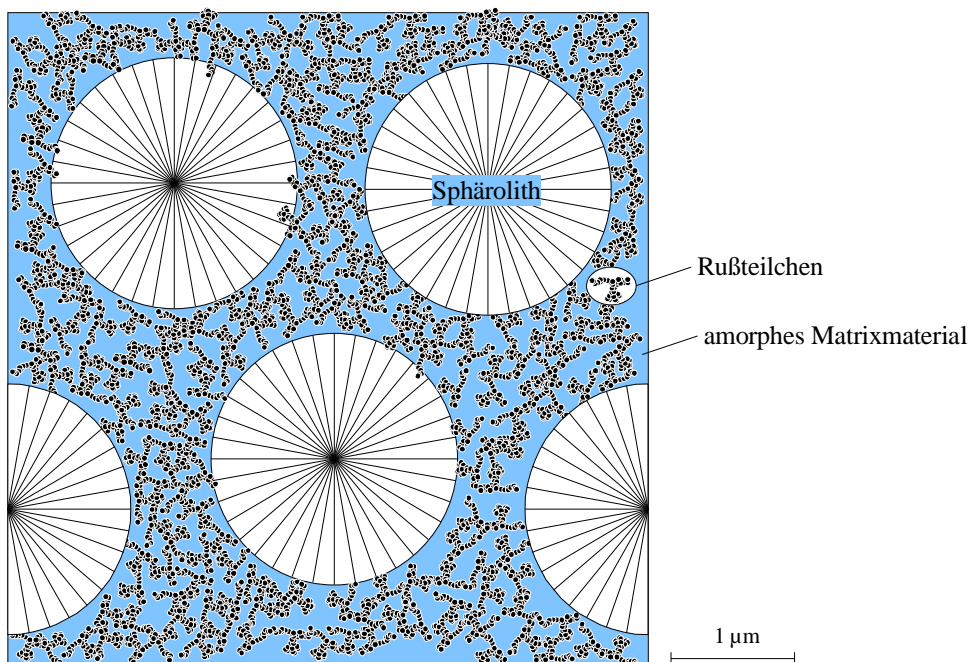


Abb. 47: Struktur des zentralen Compoundbereichs

zu 3.: oberflächennaher Bereich des Compounds

Die oberflächennahe Schicht des Compounds ist analog der des Metalls durch mikroskopische und makroskopische Rauheiten gekennzeichnet. Zur Quantifizierung dieser Rauheiten wurde die Oberfläche ebenfalls mit dem Profilometer UBC 14 von UBM abgerastert. Die Ausbildung einer

mit den Metallen vergleichbaren Fremdschicht wird nicht beobachtet. Jedoch besitzt die oberflächennahe Schicht eine vom zentralen Bereich abweichende Struktur. Bedingt durch die schnellere Abkühlung wird bei teilkristallinen Kunststoffen im Bereich der Randzone eine geringere Kristallinität und eine kleinere Kristallitgröße beobachtet. Die Herleitung der oberflächennahen Struktur des Beispielcompounds HDPE + 40 Mas% Ruß erfolgt an Hand der folgenden Kenngrößen:

- Dicke der Randzone: etwa 3 μm (Anhang 7-4),
- Größe der Sphärolithe an der Oberfläche der Randzone: 0,5 μm ... 1 μm (Anhang 7-5) und
- Sphärolithgehalt der Matrix in der oberflächennahen Zone: etwa 23 Vol%.

Somit ergibt sich das folgende Volumenverhältnis: $V_{\text{RUß}} / V_{\text{HDPE_KRISTALLIN}} / V_{\text{HDPE_AMORPH}} = 30 / 16 / 54$. Im mikroskopischen Kontaktmodell besteht somit ein Randzonenbezirk von 10000 FE aus 219 Rußteilchen (entsprechend 3000 FE); 1600 FE entfallen auf die Sphärolithe sowie 5400 FE auf den amorphen Matrixanteil (Abb. 48).

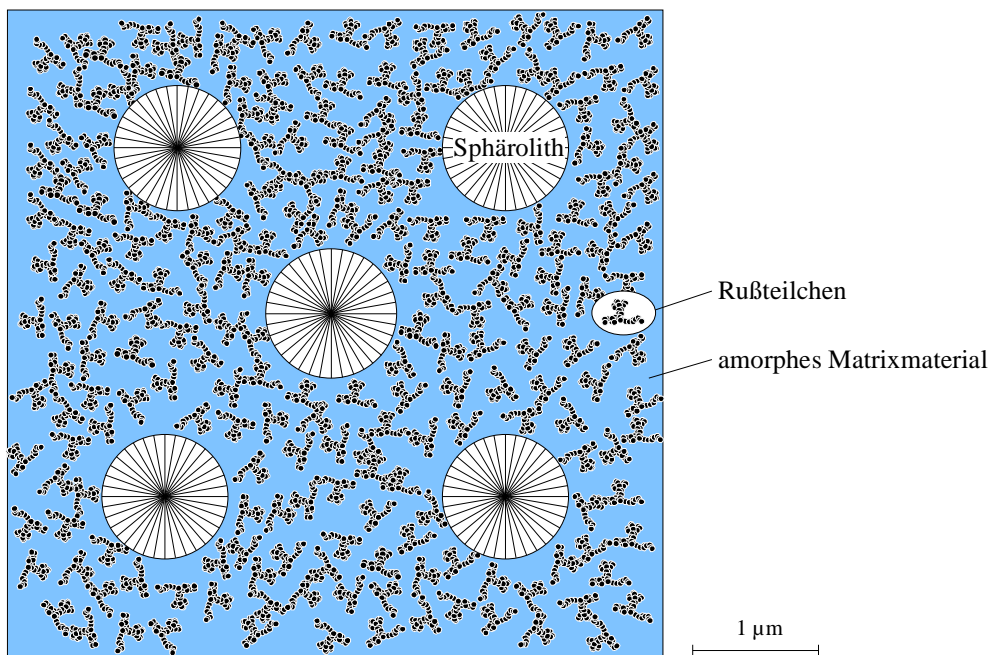


Abb. 48: Oberflächennahe Struktur

Die Rußkonzentration in der Randzone gleicht der im Compoundinneren, allerdings ist durch die geringere Kristallinität der amorphe Anteil größer. Da sich die Rußteilchen aber überwiegend im amorphen Matrixmaterial befinden, sind sie weniger eng gepackt. Dies führt zu einer höheren Perkolationschwelle und zu einer niedrigeren Leitfähigkeit der Randzone verglichen mit dem Compoundinneren.

Wegen der Oberflächenrauheiten ist die wahre Berührungsfläche kleiner als die scheinbare Kontaktfläche. Deswegen ist in der Randzone der stromtragende Querschnitt geringer und die

Stromdichte höher als im Volumen.

Wie in der Abbildung 103 (Anhang 7-4) erkennbar, existiert keine Grenze im eigentlichem Sinne zwischen der Randzone und dem zentralen Bereich. Vielmehr wird ein kontinuierlicher Übergang verzeichnet, der durch eine kontinuierliche Zunahme der Anzahl und der Größe der Sphärolithe gekennzeichnet ist. Auf eine Abbildung dieses Effekts im mikroskopischen Kontaktmodell (Abb. 46) wird in 1. Näherung verzichtet.

5.8 Bewertung der Kontaktierung durch den Gütefaktor

Wie im Abschnitt 5.7.1 dargestellt, sind die makroskopischen Rauheiten die Ursache, dass die scheinbare Kontaktfläche von Gebieten höherer und niedrigerer Berührungsstellendichte geprägt ist.



Abb. 49: Abbrandspuren in Folge Hochstrombelastung auf einer Compoundoberfläche

Wird ein kraftkontaktierter Compoundprobekörper einer Hochstrombelastung ausgesetzt, werden Gebiete höherer Berührungsstellendichte Gebieten höherer Stromdichte entsprechen. Eine höhere Stromdichte führt in den oberflächennahen Compoundbereichen zu einem erhöhten Energieumsatz und somit zum vordringlichen Abbrand von Compoundmaterial (siehe Abschnitt 6.4.3.3) in diesen Bereichen.

Erkennbar sind diese dann an den in der Compoundoberfläche zurückgebliebenen Vertiefungen (Abb. 49).

Wird aufbauend auf Abschnitt 5.2 angenommen, dass der Durchmesser eines Gebiets mit höherer Berührungsstellendichte groß gegenüber der Compounddicke ist, kann das elektrische Strömungsfeld im Compoundinneren als homogen angesehen werden. Vernachlässigt man des weiteren den Stromfluss über die Gebiete mit niedriger Berührungsstellendichte sowie den

Engewiderstand kann wie beschrieben die Beziehung $\frac{A_T}{A_S} = \frac{\rho_T}{\rho_S}$ aufgestellt werden. Dieses

Vorgehen ist - in ähnlicher Form - ein in der Literatur häufig anzutreffender Ansatz ([14], [15] und [27]). Es bietet eine in der Praxis leicht zu handhabende Größe, um eine Aussage über die Qualität eines Kontakts zu gewinnen. Dieser als Gütefaktor Q bezeichnete Wert wird für die

vorliegende Arbeit wie folgt definiert: $Q = \frac{\rho_s}{\rho_T}$. Er ist immer größer als eins. Je näher Q jedoch

eins kommt, desto besser ist die Qualität der Kontaktierung.

Um die Größe des Fehlers abschätzen zu können, der durch die Vereinfachungen zur Definition von Q entstanden ist, wird die folgende Betrachtung angestellt. Wie bereits festgestellt, existiert ein Zusammenhang zwischen dem durch eine Hochstrombeanspruchung entstandenen Abbrandbild auf der Compoundoberfläche und den Gebieten höherer Berührungsstellendichte.

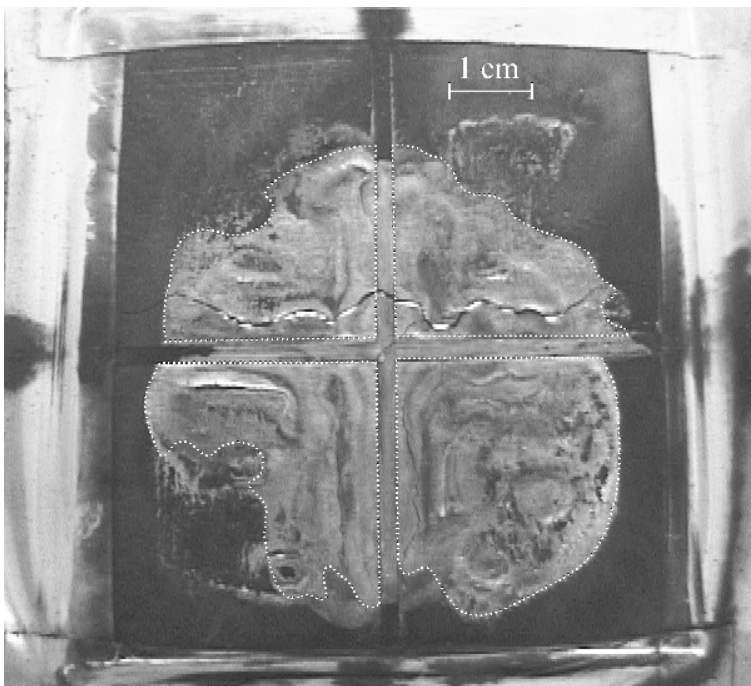


Abb. 50: Abbrandbild auf der Oberfläche eines Probekörpers

In Abbildung 50 ist der geschaltete Probekörper des Schaltversuchs 101109 (siehe Abschnitt 6.3, Abb. 52) dargestellt. Die Bereiche, wo es im verstärktem Maße zum Compoundabbrand gekommen ist, sind an der helleren Färbung zu erkennen (die kreuzartig angeordneten Stege in der Mitte dienen der mechanischen Stabilisierung und sind nicht stromtragend). Ermittelt man die Größe der in der Abbildung 50 markierten Bereiche,

so erhält man eine Fläche von $17,6 \text{ cm}^2$. Bei einer scheinbaren Kontaktfläche von $37,2 \text{ cm}^2$ ergibt sich hieraus für den Gütefaktor ein Wert von 2,11. Bestimmt man den Gütefaktor hingegen über den scheinbaren spezifischen Compoundwiderstand ($R_0 = 11,8 \text{ m}\Omega$, $\rho_T = 1,33 \text{ }\Omega\text{cm}$), so bekommt man einen Wert von 2,93. Die Abweichung beträgt - trotz aller Vereinfachungen - nur 28 %. Somit stellt der Gütefaktor nicht nur eine leicht zu handhabende sondern auch eine aussagekräftige Größe zur Charakterisierung der Qualität einer Kontaktierung im praktischen Einsatz dar.

6 Funktionsweise des kontaktierten Compounds bei Hochstrombelastung

Gegenstand der Arbeit ist die Kurzschlussstrombegrenzung unter Zuhilfenahme von leitfähigen Polymercompounds. Eine wirkungsvolle Strombegrenzung setzt eine, den konkreten Netzbedingungen entsprechende Dimensionierung des kontaktierten Polymercompounds voraus. Dabei ist zu unterscheiden zwischen:

1. Nennbetrieb: Der fließende Strom muss über eine beliebig lange Zeit geführt werden, ohne dass sich der Widerstand des Compounds wesentlich ändert.
2. Überlast: Dieser Strom muß in Abhängigkeit seiner Höhe über eine gewisse Zeit toleriert werden.
3. Kurzschluss: In diesem Fall soll durch eine Erhöhung des Widerstands des polymeren Strombegrenzers der prospektive Strom so schnell wie möglich (≤ 1 ms) begrenzt werden.

Die nachfolgenden Ausführungen beschäftigen sich mit den Prozessen und deren Ursachen die zu einer Widerstandserhöhung führen. Da keine konkrete Dimensionierung betrachtet wird, finden nicht die Begriffe Überlast oder Kurzschluss Verwendung sondern der Begriff Hochstrombelastung.

Der Untersuchungsgegenstand beschränkt sich im Folgenden nicht nur auf das Polymercompound an sich, sondern umfasst das mittels Kraftkontaktierung konfektionierte Compound entsprechend Anhang 6.

6.1 Gebräuchliche Erklärungsansätze zur Strombegrenzung

Der Widerstandsanstieg ist die Ursache für das strombegrenzende Verhalten der polymeren Strombegrenzer bei Hochstrombelastung. Die in der Literatur anzutreffenden Erklärungsansätze für den Widerstandsanstieg können in 3 Gruppen eingeteilt werden:

1. PTC-Effekt
 2. Oberflächeneffekt
 3. Mischformen
1. **PTC-Effekt:** In den früheren Publikationen z.B. [22] und [44] wird als Ursache für den Widerstandsanstieg der PTC-Effekt genannt. Man geht davon aus, dass der Stromfluss das gesamte Compoundvolumen bis zur Sprungtemperatur erwärmt und es somit in den hochohmigen Zustand versetzt.
 2. **Oberflächeneffekt:** In nahezu allen neueren Publikationen wird für die Strombegrenzung der Oberflächeneffekt verantwortlich gemacht. Unter Oberflächeneffekt wird dabei die Widerstandserhöhung des polymeren Strombegrenzers durch das vollständige oder zumindest

partielle Abheben der Elektroden vom Compound bei Hochstrombeanspruchung verstanden. Als Ursachen für die Elektrodenabhebung werden zwei unterschiedliche Gründe genannt:

- a. **Zersetzungsgas** [18]: In Folge des Engwiderstands findet in der oberflächennahen Schicht des Compounds ein wesentlich schnellerer Temperaturanstieg als im Compoundinneren statt. Nachdem die Zersetzungstemperatur in dieser Schicht überschritten wurde, kommt es zur Entstehung von Zersetzungsgas. Der somit entstandene Druck führt zum Abheben der Elektroden. Dieser Vorgang ist mit einem lauten Knall und einer Lichterscheinung verbunden. Da der Stromfluss nicht unterbrochen wird, die Elektroden aber auch keinen Kontakt mehr zum Compound haben, vermutet man, dass es zur Ausbildung eines Lichtbogens kommt. Den hohen Spannungsabfall über dem Lichtbogen führt man auf den hohen Druck und die Deionisationseigenschaften des Zersetzungsgases zurück. Das beobachtete Verhalten soll für Fehlerstromdichten von größer als 10 A/cm^2 im Ersatz für den PTC-Effekt beobachtbar sein.
 - b. **elektrodynamische Kräfte** [43]: Weil die Elektroden mit dem Compound nicht verbunden sind (man spricht von „makes free contact“), kommt es bei Hochstrombelastung zu elektrodynamischen Repulsionskräften die ein Abheben der Elektroden bewerkstelligen.
3. **Mischformen**: In [16] wird darauf hingewiesen, dass es zusätzlich zu dem Vorgang wie er in [18] dargestellt ist, zum PTC-Effekt in der Grenzschicht kommt. Eine Erklärung, zum Stromübergang zwischen abgehobener Elektrode und Compound, wird nicht gegeben. In [13] wird des weiteren darauf verwiesen, dass das Vorhandensein eines „moderaten“ PTC-Effekts nützlich ist. Der PTC-Effekt gewährleistet eine gute Verteilung des Stroms auf das Compoundvolumen und wirkt somit einem Durchbrennen entgegen.

6.2 Offene Fragen / Unzulänglichkeiten

Nachfolgend sind zusammenfassend Fragestellungen formuliert, welche von den Darstellungen in der Literatur aufgeworfen werden. Es sollen Widersprüche offen gelegt werden, die sich aus dem Vergleich der Quellen untereinander sowie aus dem Vergleich mit eigenen Messungen und Beobachtungen ergeben.

1. Ist der PTC-Effekt die Ursache für die Strombegrenzung?
2. Kann der Oberflächeneffekt das Verhalten der polymeren Strombegrenzer bei Hochstrombeanspruchung erklären?
3. Was ist beim Oberflächeneffekt die Ursache für das Abheben der Elektroden?
4. Wie geschieht der Stromübergang von der abgehobenen Elektrode zum Compound?

6.2.1 Zur Rolle des PTC-Effekts

Ob der PTC-Effekt im Compoundvolumen die Ursache für die Strombegrenzung ist, soll an Hand einer Simulationsrechnung überprüft werden. Mit Hilfe des im Anhang 9 dargestellten Simulationsmodells wird den Messschrieben des Schaltversuchs 101109 das Verhalten gegenübergestellt, welches vorhanden wäre, wenn der Widerstandsanstieg allein die Folge des PTC-Effekts ist.

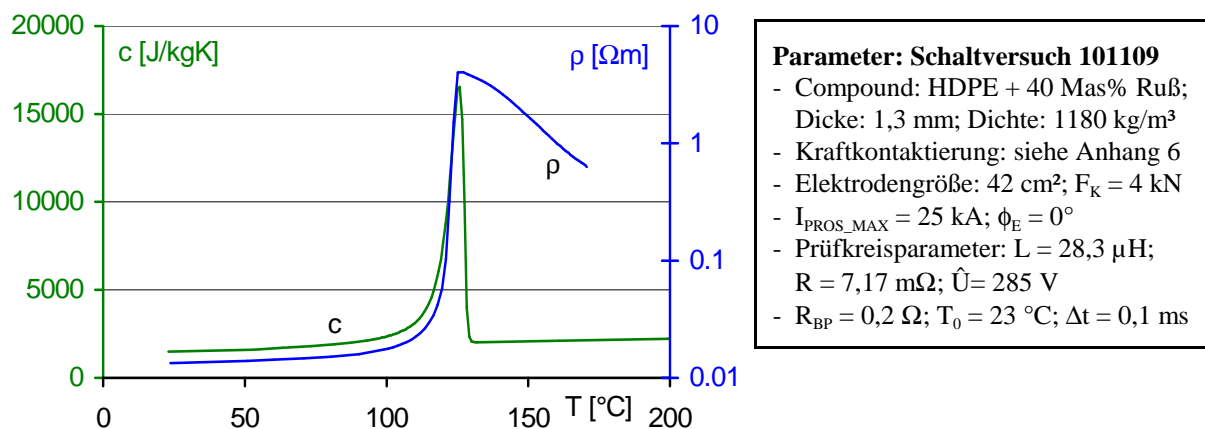


Abb. 51: Spez. Wärmekapazität und spez. Widerstand als Funktion der Temperatur für HDPE + 40 % Ruß

Der spezifische Widerstand als Funktion der Temperatur wurde mittels einer Ofen- (Anhang 2) sowie einer 4-Punkt-Messung (Anhang 4) und die spezifische Wärmekapazität mittels einer DSC-Messung bestimmt (Abb. 51).

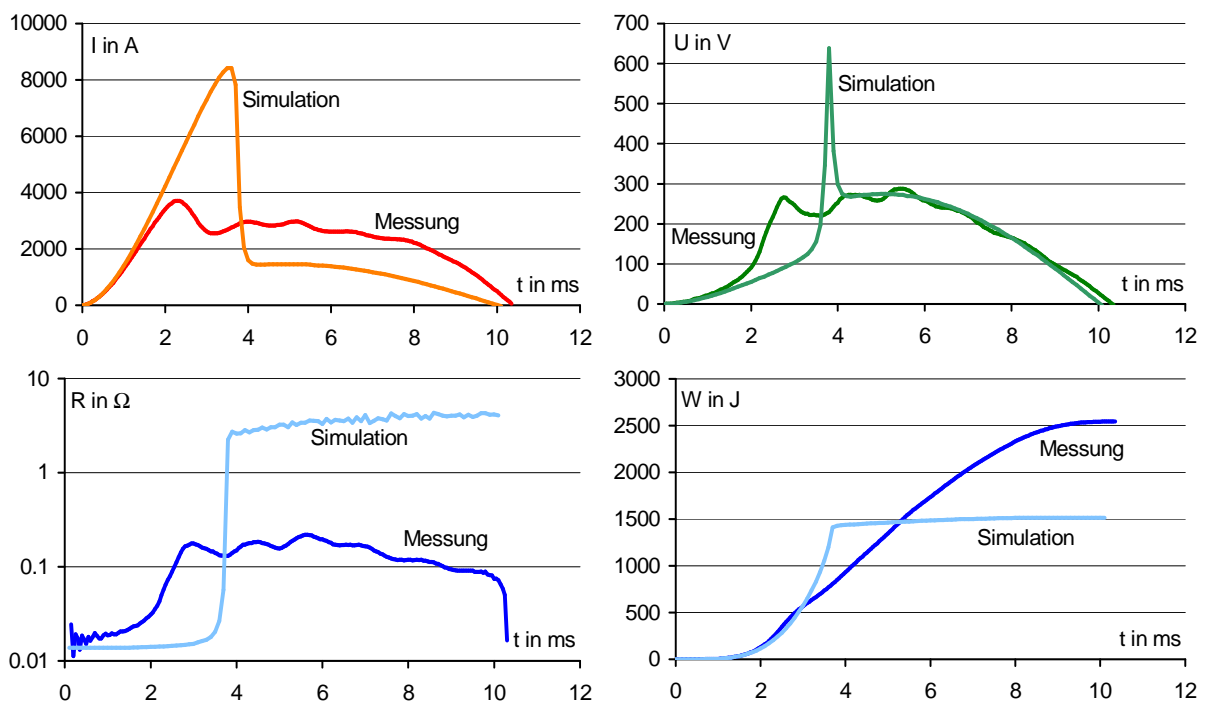


Abb. 52: Vergleich zwischen Messung (Schaltversuch 101109) und Simulation

Durch den Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit denen der Messung kann ausgeschlossen werden, dass der PTC-Effekt im Compoundvolumen allein für das Verhalten eines polymeren Strombegrenzers bei Hochstrombelastung verantwortlich ist (Abb. 52). Die Differenzen zwischen Simulation und Messung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In der Realität ist die bis zum Ansprechen benötigte Energiemenge bedeutend kleiner als in der Simulation.
- Der Übergang vom Durchgangs- in den Sperrbereich erfolgt in der Simulation plötzlicher.
- Der simulierte Wert des Widerstands im Sperrbereich ist bedeutend größer als der gemessene.

6.2.2 Oberflächeneffekt und Strombegrenzung

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird der Schaltversuch 190508 betrachtet. Ziel des Versuchs ist die Bestimmung des Compoundwiderstands über das Ende der Hochstrombelastung hinaus. Zu diesem Zweck wird parallel zum Probekörper eine Gleichspannungsquelle 200 V, 10 A geschaltet. Die Entkopplung zwischen Hauptstromkreis und Gleichstromkreis erfolgt durch einen 20 Ω Widerstand.

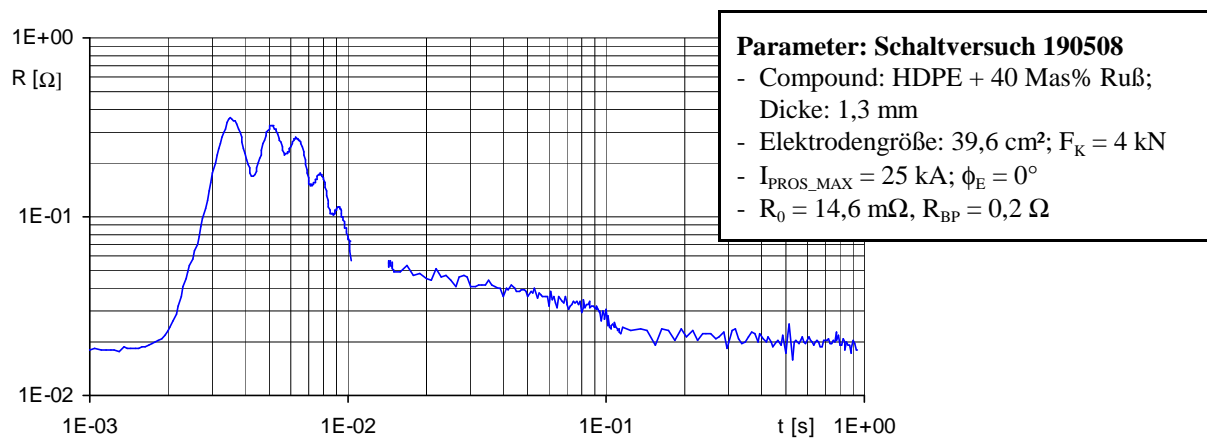


Abb. 53: Bestimmung des Compoundwiderstands über das Ende des Stromflusses im Hauptstromkreis hinaus

Die Stromflusszeit im Hauptstromkreis beträgt 10 ms. In den sich anschließenden 5 ms ist durch das Ausräumen der Thyristorsperrschichten bedingt keine Messung möglich.

Im Widerstandsmessschrieb (Abb. 53) ist zu erkennen, dass der Widerstand des polymeren Strombegrenzers unmittelbar nach dem Schaltversuch bei ca. 55 m Ω liegt. Im weiteren Verlauf erreicht dieser dann innerhalb von 1 s wieder seinen Ausgangswert. Das langsame Absinken des Widerstands kann nicht vom Abheben der Elektroden herrühren, sondern deutet viel mehr auf einen thermischen Vorgang hin. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass der Oberflächeneffekt nicht

allein für das Verhalten eines polymeren Strombegrenzers bei Hochstrombelastung verantwortlich ist.

6.2.3 Oberflächeneffekt und Kontaktöffnung

Messungen die den Zusammenhang zwischen Kontaktkraft bzw. Abhebehöhe der Elektroden dem Widerstand des polymeren Strombegrenzers gegenüberstellen, sind nicht verbreitet. Ebenso wenig bekannt sind Publikationen, die belegen, ob der Druck der Zersetzungsgase oder die Repulsionskräfte verantwortlich für das Abheben der Elektroden sind.

6.2.4 Stromübergang bei abgehobener Elektrode

Die Frage des Stromübergangs zwischen der abgehobenen Elektrode und dem Compound verdient insofern Aufmerksamkeit, da sie in der Literatur - wenn überhaupt - nur in knapper Form angesprochen wird. Man vermutet, dass es zur Ausbildung eines Lichtbogens kommt. Bei Abhebehöhen bzw. Bogenspannungen in den Größenordnungen von 200 μm bzw. 500 V sollten die Gegebenheiten etwas genauer betrachtet werden.

6.3 Darstellung des Verhaltens von polymeren Strombegrenzern bei Hochstrombelastung

Eine einfache Betrachtung bei der Erklärung des Verhaltens eines polymeren Strombegrenzers bei Hochstrombelastung erweist sich, wie die Ausführungen im Abschnitt 6.2 verdeutlicht haben, als problematisch. Dies legt die Vermutung nahe, dass der Widerstandsanstieg aus einer Abfolge mehrerer Prozesse bzw. Modifikationen eines Prozesses besteht. Es ist somit die Frage zu stellen, wie diese unterschieden werden können. Jeder Prozess bzw. jede Modifikation verfügt über einen charakteristischen - wenn auch komplexen - funktionalen Zusammenhang zur umgesetzten Energie, zur Zeit, zur Temperatur und zum Strom. Da diese Größen ihren Wert nicht sprunghaft ändern können (beim Strom mit der Einschränkung auf induktive Netzwerke), wird im Widerstandsmessschrieb beim Übergang von einem auf den nachfolgenden Prozess eine signifikante Änderung des Widerstandsanstiegs zu verzeichnen sein.

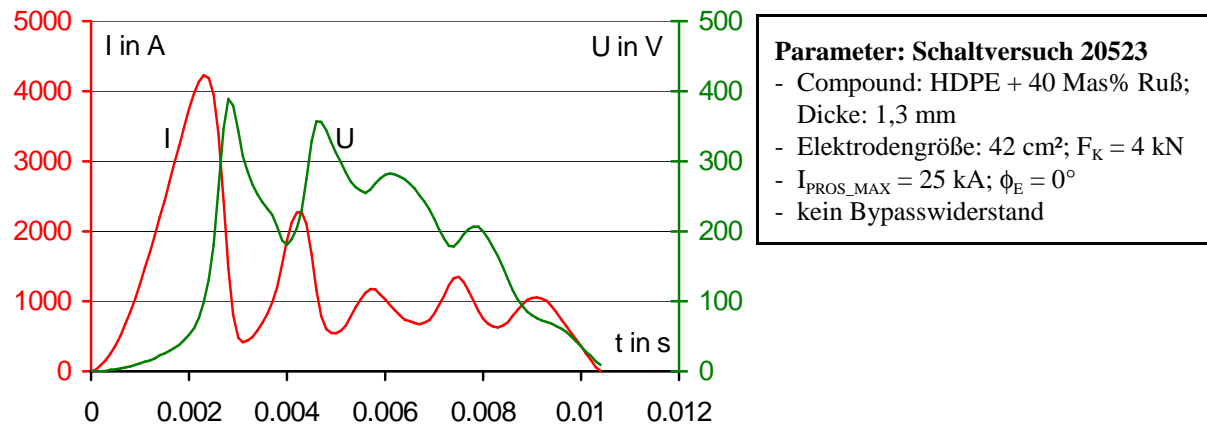


Abb. 54: U(t)- und I(t)-Schrieb des Schaltversuchs 20523

Zu diesem Zweck soll der Schaltversuch 20523 (Abb. 54) betrachtet werden. Die Parameter entsprechen dem Schaltversuch 101109 (siehe Abschnitt 6.3) mit dem Unterschied, dass auf den Einsatz eines Bypasswiderstands verzichtet wurde. Diesem Vorgehen liegt der Wunsch zu Grunde, ein Verschleifen der einzelnen Mechanismen durch das Kommutieren des Stroms auf den Bypasszweig zu vermeiden.

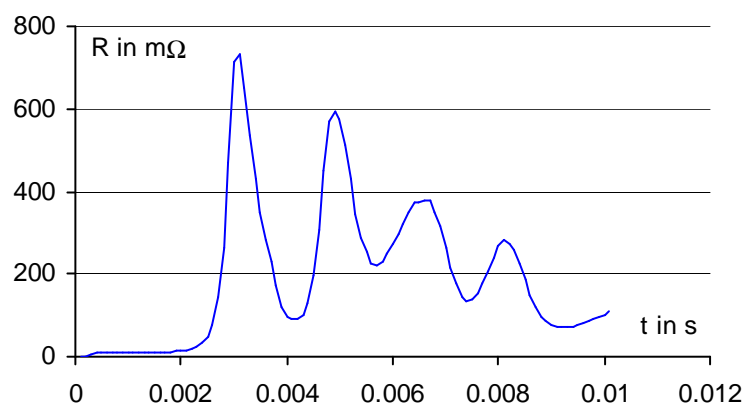


Abb. 55: R(t)-Schrieb des Schaltversuchs 20523

Eine signifikante Änderung des Widerstandsanstiegs ist jedoch nicht erkennbar (Abb. 55). Der Übergang der Einzelmechanismen ineinander erfolgt so schnell, dass eine Unterscheidung nicht möglich ist. Somit wird in der nachfolgenden Versuchsreihe der Strom so niedrig gewählt, dass das

Ansprechen im 100 ms-Bereich erfolgt. Beginnend von niedrigen Werten erfolgt eine Steigerung des Stroms, so dass eine Unterscheidung der einzelnen Wirkungen möglich wird. Bei der Durchführung dieser Versuche ergeben sich wegen der Verwendung von Wechselstrom in Folge der Stromnulldurchgänge die folgenden Probleme:

- Beeinflussung der Strömungsvorgänge des Zersetzungsgases und
- starker Anstieg des Quantisierungsrauschens bei der Division der niedrig aufgelösten Strom- und Spannungswerte.

Somit ist es vorteilhaft Gleichstrom zu verwenden. Das Versuchsfeld in dem die Versuche durchgeführt wurden, ist im Anhang 8 dargestellt. Zur Gleichrichtung diente eine 6-Puls-Brücke

bestehend aus 250 A Dioden. Für die Gleichspannung wurde ein Wert von 225 V eingestellt. Als Draufscharter kam ein 400 A Luft-Schütz der schweren Baureihe zum Einsatz. Ausgeschalten wurde mit dem Sicherheitsschalter. Um das Grenzlastintegral der verwendeten Dioden nicht zu überschreiten, war es notwendig die aktive Probekörpergröße zu verringern. So kam eine Elektrodengröße von 32 x 32 mm² zum Einsatz. Zur Unterscheidung der einzelnen Schaltversuche sind in den Diagrammen der prospektive Strom und die Nummer des Versuchs vermerkt (Abb. 56).

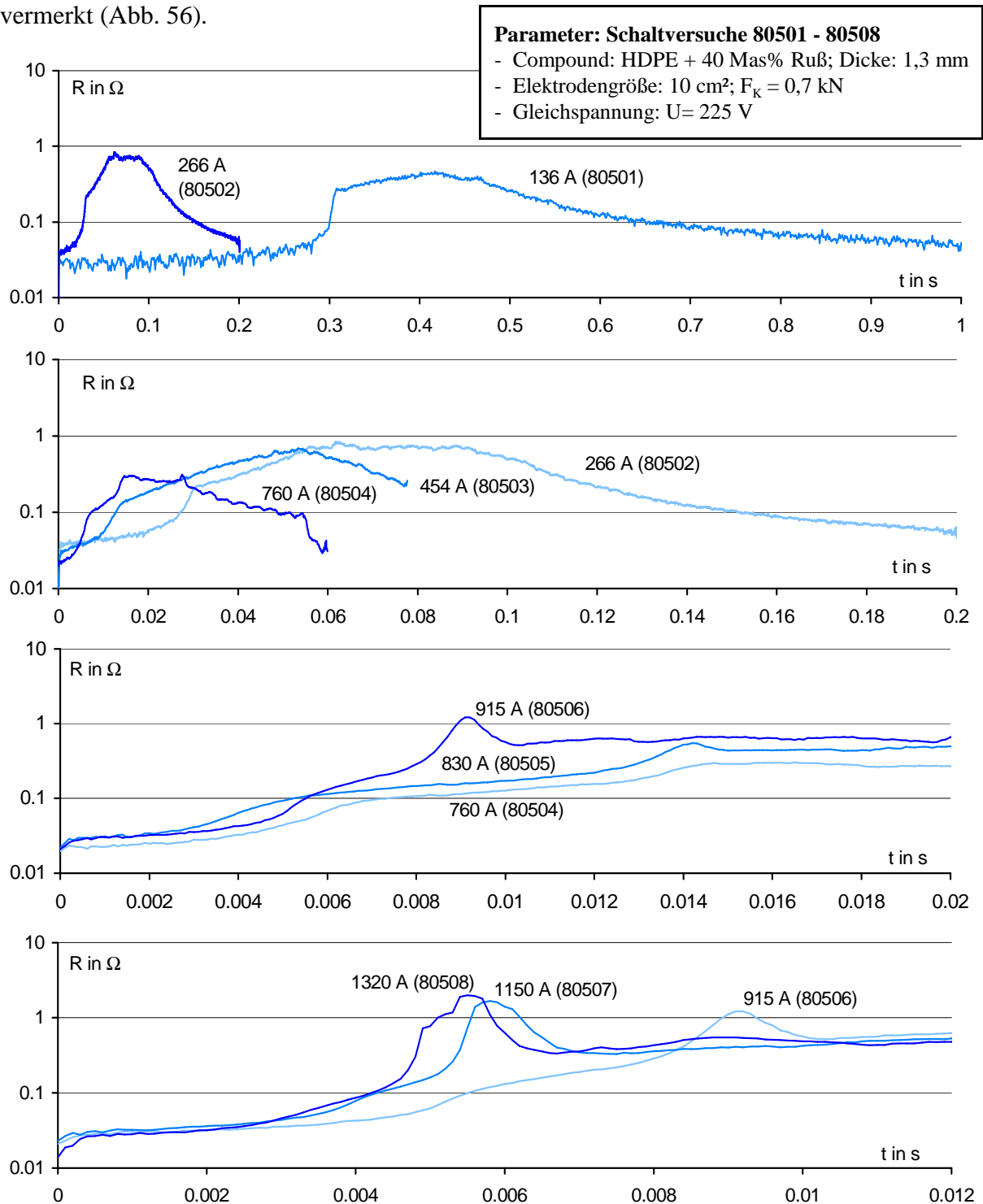


Abb. 56: Gleichstromschaltversuche 80501 ... 80508

Im Ergebnis dieser Schaltversuche kann festgestellt werden, dass eine Reihe signifikanter Änderungen des Widerstandsanstiegs zu beobachten ist. Die Intensität dieser Änderungen sowie die einem Wirkmechanismus zuordenbare Widerstandsänderung selbst ist von der Stromstärke abhängig.

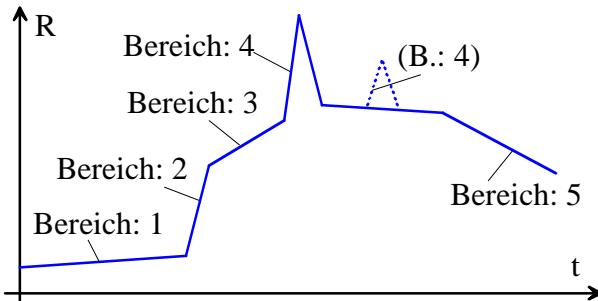


Abb. 57: Prinzipielles Verhalten der kraftkontaktierten Compounds bei Hochstrombelastung

Prinzipiell kann das Verhalten der polymeren Strombegrenzer in die in Abbildung 57 dargestellten Bereiche unterteilt werden. Bei den 136 A -, 266 A - und 454 A - Schaltversuchen sind nur die Bereiche 1, 2, 3 und 5 erkennbar. Ab dem 760 A - Schaltversuch wird zusätzlich noch der

Bereich 4 sichtbar. Mit zunehmender Stromstärke nimmt der sichtbare Anteil von 2 und 3 ab. Des weiteren wird mit der Zunahme der Stromstärke eine Zunahme der Geschwindigkeit des Gesamtvorgangs beobachtet. Ob dabei die mit den Widerstandsanstiegen 2 und 3 verbundenen Wirkungen nicht mehr zu tragen kommen oder durch die zunehmende Dominanz des Bereichs 4 nur nicht mehr sichtbar sind, wird im Abschnitt 6.4.3.4 geklärt. Wie am Beispiel des Schaltversuchs 20523 (Abb. 55) ersichtlich, kann der Bereich 4 auch mehrmals hintereinander auftreten.

6.4 Weiterentwickelter Ansatz zur Erklärung der Strombegrenzung

Es kann festgestellt werden, dass für den Widerstandsanstieg eines polymeren Strombegrenzers in Folge Hochstrombelastung mehrere Effekte - in einer vom Strom (besser: Stromdichte) abhängigen Wertigkeit - verantwortlich sind. Jedoch ist es notwendig, wie die Ausführungen im Abschnitt 6.3 gezeigt haben, eine weitere Differenzierung für die vollständige Erklärung des Verhaltens vorzunehmen. Zur Beantwortung der offenen Fragen werden dazu im Folgenden entsprechende Versuchsergebnisse diskutiert sowie Erklärungsansätze aufgezeigt. Aufbauend auf das entwickelte Kontaktmodell und dem Verständnis der Wirkungsweise des Compounds, wird das zur Widerstandserhöhung führende Verhalten eines polymeren Strombegrenzers dargelegt. Die einzelnen Effekte sollen dabei nach dem Ort des Auftretens ihrer Wirkungen im Compound unterschieden werden.

6.4.1 Wirkungen im Volumen

Wie in den Abschnitten 3.9 und 3.10 dargelegt, umfaßt die Wirkung im Compoundvolumen den PTC- und den NTC-Effekt. Zur Charakterisierung eines polymeren Strombegrenzer bei Hochstrombelastung ist diese Beschreibung wie Abschnitt 6.2.1 gezeigt hat jedoch ungenügend. Bedingt durch die makroskopischen Oberflächenrauheiten gibt es Gebiete mit höherer und niedrigerer Berührungsstellendichte. Ein Maß zur Quantifizierung dieser Problematik ist der Gütefaktor Q . Da der Strom - bedingt durch den niedrigen Kontaktwiderstand - im wesentlichen durch die Gebiete fließt, die sich im Compoundvolumen direkt unterhalb der Stellen mit einer höheren Berührungsstellendichte befinden, erscheint es sinnvoll, das gesamte Compoundvolumen mittels Q in das aktive Compoundvolumen zu überführen. Im Fall des Schaltversuchs 101109 beträgt der Gütefaktor 3,42. Vergleicht man nun die Ergebnisse der Simulation (entsprechend Anhang 9) mit den Messschrieben des Schaltversuchs ergibt sich das folgende Bild (Abb. 58).

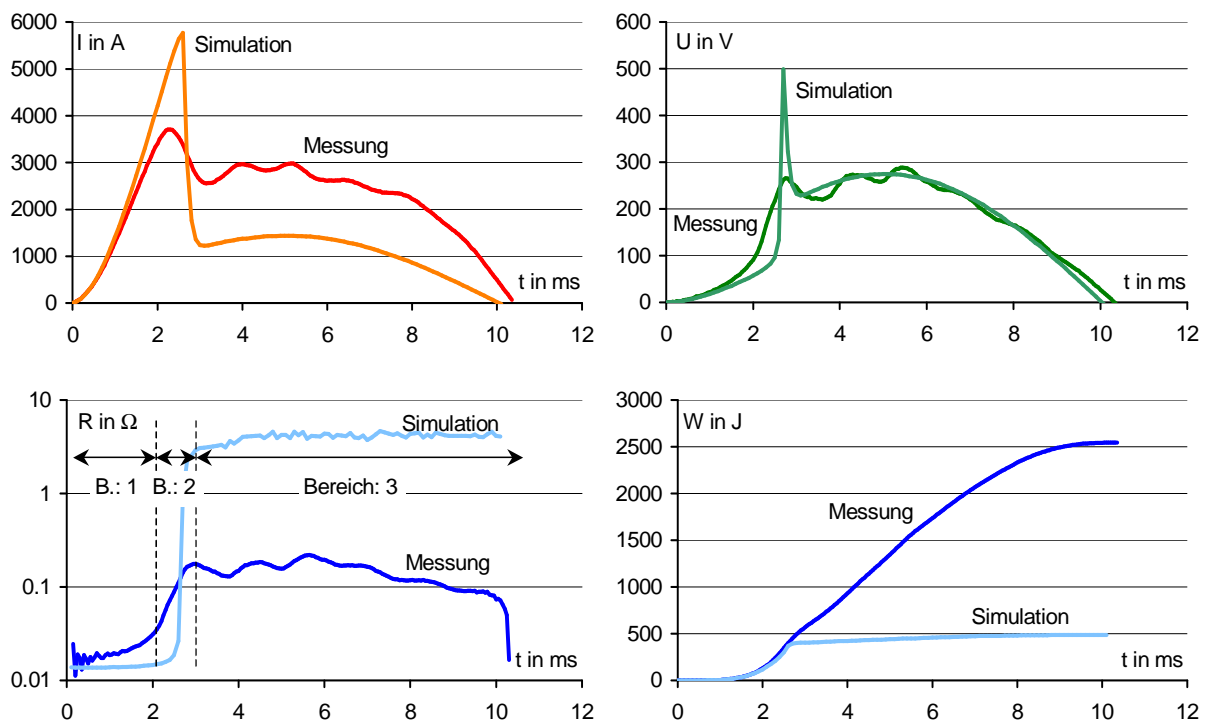


Abb. 58: Vergleich zwischen Messung (Schaltversuch 101109) und Simulation (Skalieren der Compoundmasse mit dem Gütefaktor)

Durch das Skalieren der Compoundmasse mit dem Gütefaktor läßt sich eine erhebliche Verbesserung der Simulationsergebnisse erzielen. Hinsichtlich der Schaltarbeit und der Zeit bis zum ersten Ansprechen werden gute Ergebnisse erzielt. Im $R(t)$ -Messschrieb (Abb. 58) unterscheidet sich die Simulation von der Messung in den folgenden Punkten:

- kleinerer Widerstandsanstieg im Durchgangsbereich (Bereich 1),
- steilerer Übergang vom Durchgangs- in den Sperrbereich (Bereich 2) und

- der viel höhere Widerstand im Sperrbereich (Bereich 3).

Aus diesen Abweichungen ergeben sich die Differenzen im Strom- und Spannungsverlauf. Um die Abweichungen im Widerstandsverlauf zu erklären, soll der nachfolgende, aus dem makroskopischen Kontaktmodell abgeleitete schematisierte Stromdichteverlauf (Abb. 59) betrachtet werden.

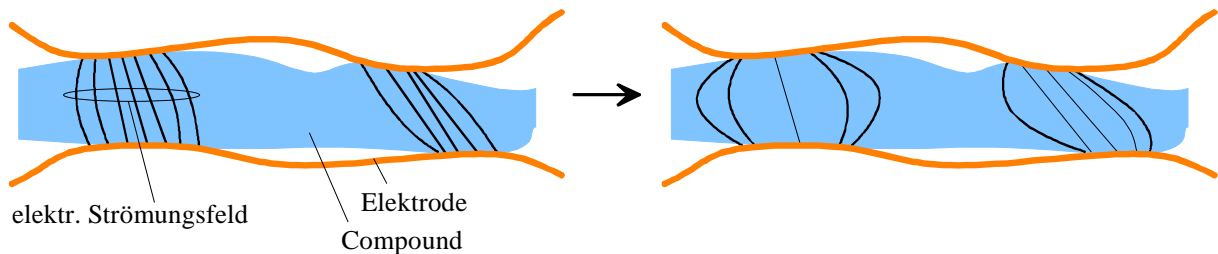


Abb. 59: Makroskopisches Strömungsfeld

Zu Beginn der Hochstrombelastung konzentriert sich das elektrische Strömungsfeld im wesentlichen auf die Bereiche im Compound, welche sich direkt zwischen den Bereichen mit höherer Berührungsstellendichte befinden. Die durch den Stromfluss hervorgerufene, bei Hochstrombelastung als nahezu adiabatisch anzusehende Erwärmung beschränkt sich somit ebenfalls auf dieses Gebiet. Wird in Folge weiterer Erwärmung die Sprungtemperatur überschritten, werden diese Bereiche hochohmig. In der Simulation mit konzentrierten Parametern bedingt dies den raschen Übergang des gesamten Compounds vom nieder- in den hochohmigen Zustand. Da in der Simulation das Verhalten bis zum Erreichen der Sprungtemperatur dem der Realität recht nahe kommt, liefert die Simulation bezüglich der Zeit und der notwendigen Schaltarbeit bis zum Ansprechen gute Ergebnisse. Der Übergang vom nieder- in den hochohmigen Zustand beginnt in der Realität jedoch früher und verläuft nicht so rasch. Werden die Compoundbereiche die sich direkt zwischen Bereichen höherer Berührungsstellendichte befinden höherohmsch, erfolgt eine Kommutierung eines Teils des Stroms in weiter außerhalb liegende Zonen. Die Ursache hierfür ist, dass diese Zonen noch nicht so stark erwärmt und deswegen zum Zeitpunkt niederohmscher sind. Später werden diese Bereiche ebenfalls in den hochohmigen Zustand kommen, was eine weitere Kommutierung des Stroms nach sich zieht. Die somit vorliegende, nichthomogene Erwärmung des Compoundvolumens, verbunden mit der Kommutierung des Stroms, hat im dynamischen Betriebsfall (Hochstrombelastung) einen flacheren und früher beginnenden Widerstandsanstieg im Vergleich zur quasistatischen Erwärmung (Kennlinienermittlung im Ofen, Simulation mit konzentrierten Parametern) zur Folge.

Da die hochohmig gewordenen Compoundbereiche nicht komplett stromlos sind, kommt es auch

hier zu einer weiteren Erwärmung. Eine weitere Erwärmung hat jedoch wegen des NTC-Effekts einen Rückgang des Widerstands und somit auch eine Rückkommutierung des Stroms zur Folge. Bevorzugt wird dies die Bereiche betreffen, die sich direkt zwischen den Stellen höherer Berührungsstellendichte befinden. Da diese als erstes hochohmig geworden sind, sind sie - zumindest was das Volumen betrifft - am wärmsten.

Das zeitliche Aufeinanderfolgen des Erreichens der Sprungtemperatur hat zur Folge, dass - durch die Wirkungen im Volumen - der Widerstand bei Hochstrombelastung nicht den Wert erreicht, den er bei einer homogenen Erwärmung erzielen würde. Die Ursache hierfür liegt bei der Kommutierung des Stroms auf kühlere und damit niederohmschere Bereiche bzw. bei der späteren Rückkommutierung auf Bereiche deren Temperatur wesentlich über der Sprungtemperatur liegt und die deswegen wieder niederohmsch geworden sind (NTC-Effekt).

6.4.2 Wirkungen in der oberflächennahen Schicht des Volumens

Bevor es zum Ansprechen des polymeren Strombegrenzers kommt, wird in der Realität ein Widerstandsanstieg beobachtet, der bedeutend größer ist, als derjenige der sich in der Simulation mit konzentrierten Parametern ergibt (siehe Abb. 58: Bereich 1). Um dies nachzuvollziehen wird der nachfolgende, aus dem mikroskopischen Kontaktmodell abgeleitete schematisierte Stromdichteverlauf betrachtet (Abb. 60).

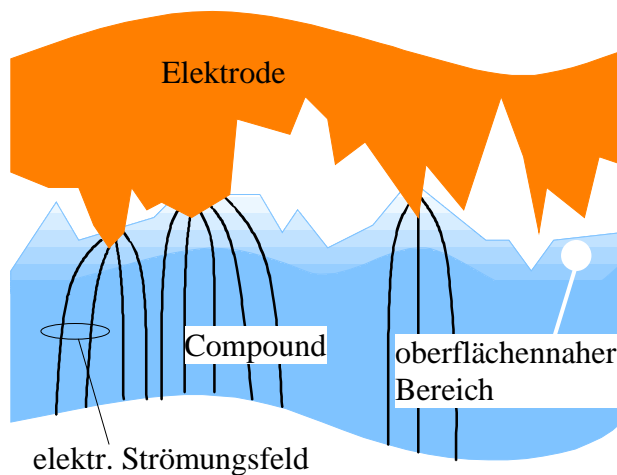


Abb. 60: Mikroskopisches Strömungsfeld

Wegen der schlechteren Leitfähigkeit der oberflächennahen Compoundbereiche sowie des kleineren stromtragenden Querschnitts (verglichen mit dem Compoundvolumen), kommt es in dieser Schicht zu einer stärkeren Erwärmung als im Volumen. Dies trifft vordergründig auf die Hochstrombelastung und der damit verbundenen adiabatischen Erwärmung zu. Somit wird die Sprungtemperatur im Bereich der

wahren Berührungsstellen eher als im Volumen überschritten. Dies ist die Ursache für den in der Messung beobachteten - verglichen mit der Simulation - größeren Widerstandsanstieg. Verbunden mit der Widerstandserhöhung ist - analog zum Volumen - eine teilweise Kommutierung des Stroms auf niederohmschere Bereiche in der Compoundoberfläche.

6.4.3 Wirkungen an der Grenzfläche Compound - Elektrode

6.4.3.1 Kontaktkraft, Elektrodenabhebung, Widerstandsanstieg

Da der durch den Oberflächeneffekt bedingte Widerstandsanstieg seine Ursache in dem Abheben der Elektroden [13, 16, 18, 43] haben soll, wäre der Zusammenhang zwischen Kontaktkraftänderung bzw. Abhebehöhe dem Widerstand des polymeren Strombegrenzers gegenüberzustellen. Zur Aufzeichnung der während der Hochstrombelastung wirkenden Kräfte, wurde im Versuchsaufbau (Anhang 6) zur bereits vorhandenen Kraftmessdose eine zweite installiert. Die erste Kraftmessdose arbeitet mit Dehnmessstreifen und hat ein Gewicht von einigen Kilogramm. In Folge ihrer mechanischen Trägheit kann sie nicht zur dynamischen Krafterfassung dienen. Die zweite Kraftmessdose, welche nur wenige Gramm wiegt und nach dem piezoelektrischen Prinzip arbeitet, kann in Folge ihres Messprinzips nicht zur Ermittlung der mechanischen Vorspannung (= Kontaktkraft), jedoch aber zur dynamischen Kraftbestimmung eingesetzt werden. Betrachtet wird erneut der Schaltversuch 20523. Die Vorspannung beträgt 4 kN (entspricht 1 MPa).

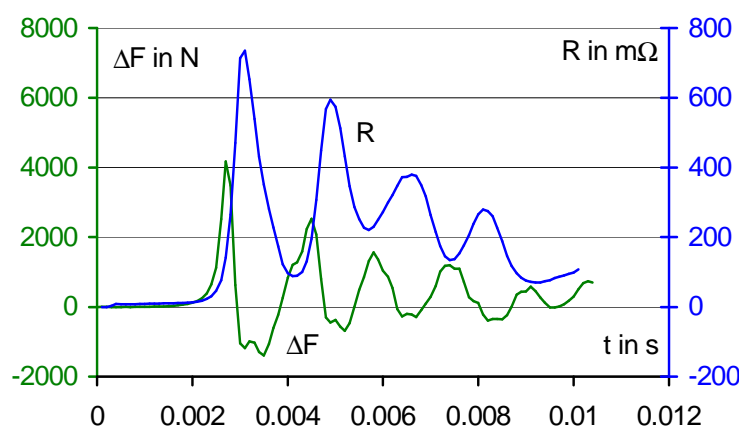


Abb. 61: Zeitlicher Verlauf von Kontaktkraftänderung und Widerstand des Schaltversuchs 20523

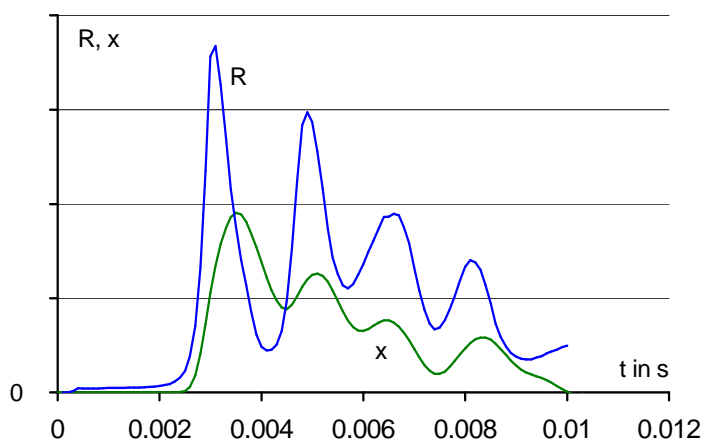


Abb. 62: Zusammenhang zwischen Abhebehöhe der Elektroden und dem Widerstand des kraftkontaktierten Compounds

Abbildung 61 stellt das Messsignal der piezoelektrischen Kraftmessdose ΔF dem Widerstand R gegenüber. Betrachtet man Frequenz und Amplitude der beiden Messsignale, kann ein Zusammenhang zwischen den beiden vermutet werden. Es ist jedoch festzustellen, dass die Maxima von Kraft und Widerstand nicht, wie erwartet, in Phase zueinander liegen.

Diese Abweichung ist durch den mechanischen Aufbau bedingt. Das Vorhandensein von Trägheitselementen ($m \cdot \ddot{x}$) führt zur Phasenverschiebung zwischen gemessener Kraft ΔF und Abhebehöhe x der Elektrode und

damit dem Widerstand R (Abb. 62). Eine Betrachtung zum Zustandekommen der Phasenverschiebung befindet sich in Anhang 10.

6.4.3.2 Ursache der Elektrodenabhebung

Da ein Zusammenhang zwischen der Kontaktkraftänderung, der Abhebehöhe der Elektroden und dem Widerstandsanstieg zu vermuten ist, wird als nächstes der Frage nach der Ursache für das Abheben der Elektroden nachgegangen. Sollte der Grund für das Abheben wie in [43] beschrieben elektromagnetischer Natur sein, müsste zu Beginn der Abhebung ein Zusammenhang zwischen der gemessenen Kontaktkraftänderung und dem Quadrat des Stroms zu verzeichnen sein. Ist hingegen ein thermischer Prozess für den Kontaktkraftanstieg verantwortlich müsste ein Zusammenhang zur umgesetzten Energie ersichtlich sein.

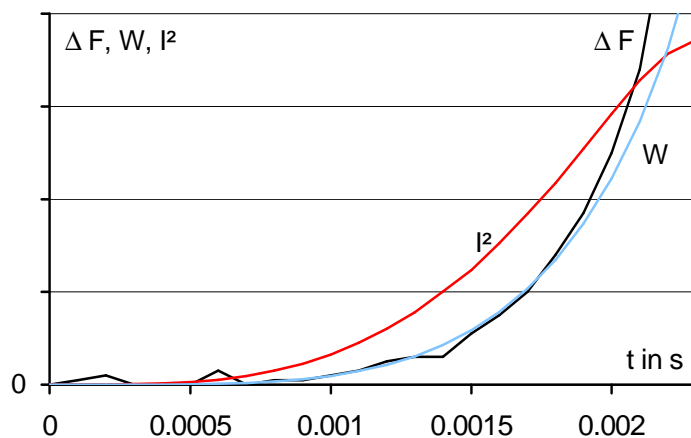


Abb. 63: Gegenüberstellung von Kontaktkraftänderung, Schaltarbeit und dem Quadrat des Stroms

Betrachtet wird der Zeitbereich von 0 bis 2,3 ms. Gut sichtbar ist, dass zwischen der mit der piezoelektrischen Kraftmessdose gemessenen Kraftänderung und der im Compound umgesetzten Energie eine deutlich bessere Korrelation besteht als zum Quadrat des Stroms (Abb. 63). Somit wird die Hypothese, nach der die Entstehung von Zersetzungsgas die Ursache für das Abheben der Elektroden ist, gestützt.

6.4.3.3 Wirkmechanismus

In Folge der höheren Stromdichte sowie der schlechteren Compoundleitfähigkeit kommt es in der oberflächennahen Schicht des Compounds zu einer stärkeren Erwärmung als im Volumen. Das Erreichen der Sprungtemperatur und der damit verbundene Widerstandsanstieg in dieser dünnen Schicht führt nur zu einem unwesentlichen Anstieg des Widerstands des polymeren Strombegrenzers. Der fließende Strom wird somit kaum begrenzt. Die Folge ist, dass die Erwärmung nahezu ungebremst fortschreitet. Beginnend von Bereichen mit hoher Berührungsstellendichte und somit hoher Stromdichte, bilden sich Seen geschmolzenen Compounds die bis zur Zersetzungstemperatur erhitzt sind (Abb. 64).

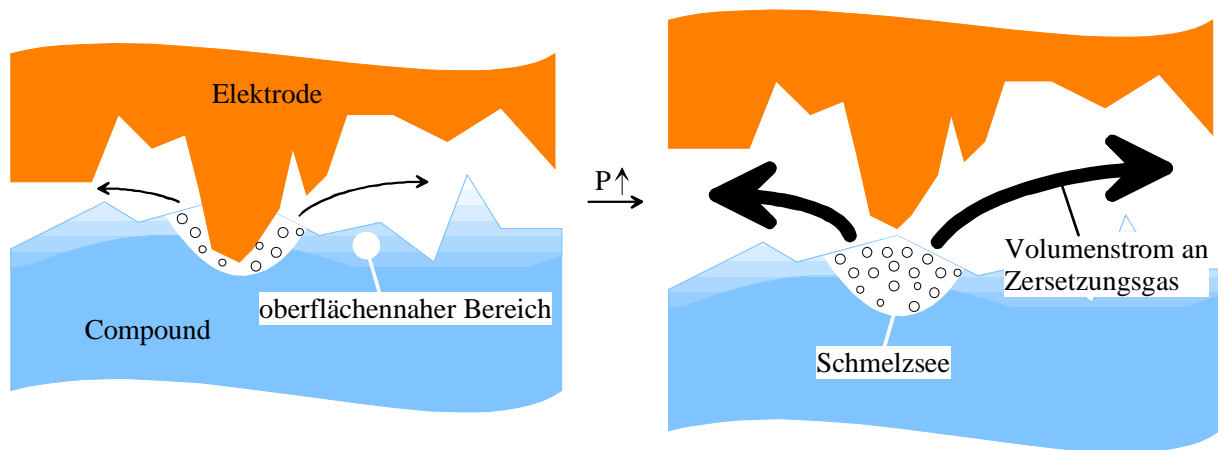


Abb. 64: Abheben der Elektrode vom Compound in Folge der Überschreitung eines Mindestvolumenstroms an Zersetzungsgas

Durch den weiteren Energieeintrag in diese - bedingt durch den NTC-Effekt - wieder niederohmsch gewordenen Compoundbereiche kommt es zur Zersetzung der Matrixkomponente. Da zur Zersetzung einer bestimmten Menge an Matrixmaterial eine bestimmte Energiemenge notwendig ist, ist einer in der Grenzschicht umgesetzten Leistung P_1 ein bestimmter Volumenstrom an Zersetzungsgas und Ruß V'_1 zuzuordnen. Damit dieser Volumenstrom entlang der durch die Oberflächenrauheiten geformten Hohlräume zwischen Metallelektrode und Compound ins Freie abströmen kann, stellt sich ein bestimmter Druck p_1 ein. Da p_1 allseitig - also auch auf die Elektrode mit der Fläche A wirkt - wirkt der Kontaktkraft F_K die Kraft $p_1 \cdot A$ entgegen. Kommt es zu einem Anstieg der umgesetzten Leistung $P_2 > P_1$ ist damit ein Anstieg des Volumenstroms an Zersetzungsgas $V'_2 > V'_1$ und eine Erhöhung des Drucks $p_2 > p_1$ verbunden. Wird nun $p_2 \cdot A > F_K$ kommt es zum Abheben der Elektrode vom Compound. Das heißt es existiert ein kritischer Wert für P bei dessen Überschreitung es zum Einsetzen des Oberflächeneffekts kommt.

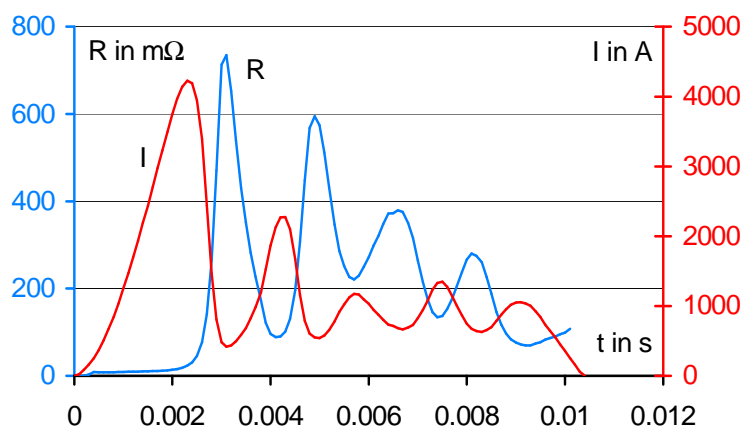


Abb. 65: Widerstandserhöhung und strombegrenzende Wirkung eines polymeren Strombegrenzers (Schaltversuch: 20523)

Gekennzeichnet ist dieser Vorgang von einer starken Widerstandszunahme des polymeren Strombegrenzers und damit einer wirkungsvollen Strombegrenzung (Abb. 65). Diese hat den Zusammenbruch der umgesetzten Leistung zur Folge, welcher von einem Rückgang der Zersetzungsgasentstehung begleitet wird.

Zugleich entweicht das im Raum zwischen abgehobener Elektrode und Compound befindliche Gaspolster. Wegen der auf die Metallelektroden wirkenden Kontaktkraft kommt es zum Wiederaufsetzen der Elektroden auf dem Compound. Das Wiederaufsetzen ist mit dem Absinken des Gesamtwiderstands des polymeren Strombegrenzers verbunden. Kommt es dabei zu einem kompletten Wiederaufsetzen der Elektrode auf das Compound, sinkt der Widerstand auf den Wert, der sich aus dem momentanen Erwärmungszustand des Compounds (Volumen-PTC-Effekt) ergibt. Dieser wieder recht niedrige Widerstand führt zu einem erneuten Anstieg des Stroms. Das aufgeschmolzene Compound an der Oberfläche wird dadurch wieder im verstärkten Maße zersetzt. Es kommt zum erneuten Druckaufbau. Übersteigt dieser die kritische Grenze, ist ein erneutes Abheben der Elektroden vom Compound die Folge. Dieser Zyklus kann sich mehrfach wiederholen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Wirkungen in der oberflächennahen Compoundschicht (Oberflächen-PTC-Effekt) die Voraussetzung für das Einsetzen der Wirkungen in der Grenzschicht (Oberflächeneffekt) darstellen. Die Wirkungen im Volumen (Volumen-PTC-Effekt) sind demgegenüber von den Wirkungen in der Grenzschicht unabhängig. Somit besteht kein kausaler Zusammenhang zwischen diesen. Es kann somit auch nicht pauschal die Frage beantwortet werden, ob der Volumen-PTC-Effekt vor oder nach dem Oberflächeneffekt auftritt. Abschließend muß in diesem Zusammenhang noch festgestellt werden, dass es in Folge des Materialabbrands zu einem Absinken der Compounddicke kommt. Dies führt selbst dann zu einem Absinken des Widerstands des polymeren Strombegrenzers, wenn sich der spezifische Compoundwiderstand nicht durch irgendeine Wirkung geändert hat.

6.4.3.4 PTC-Anteil am Gesamtwiderstandsanstieg

Bei Hochstrombelastung ist der durch den PTC-Effekt erreichbare Widerstandsanstieg bedeutend kleiner, als bei einer quasistatischen Messung. Im Abschnitt 6.3 konnte gezeigt werden, dass eine Unterscheidung der Effekte mittels einer Auswertung der Änderungen der Anstiege im $R(t)$ -Messschrieb möglich ist. Bei schnellen Vorgängen (Ansprechzeiten < 5 ms) bereitet dieses Verfahren jedoch zunehmend Schwierigkeiten. Es wäre somit zu untersuchen in wie weit hier eine Unterscheidung möglich ist. Zu diesem Zweck soll abermals der Schaltversuch 20523 betrachtet werden.

Nachdem die Sprung- und Zersetzungstemperatur in der oberflächennahen Schicht überschritten wurden, kommt es zur Zersetzung des Compounds. Die Entstehung einer kritische Menge an Zersetzungsgas führt zum Abheben der Elektroden. Der Widerstand des polymeren

Strombegrenzers steigt auf über $700\text{ m}\Omega$ (Abb. 66). Der Strom wird begrenzt, die Leistung und in der Folge der Volumenstrom an Zersetzungsgas brechen zusammen.

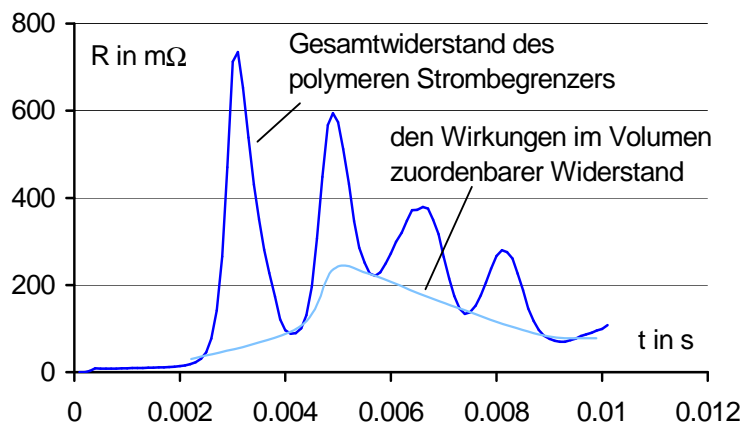


Abb. 66: Schaltversuch 20523: dem Volumen zuordenbarer Widerstand

Die Elektroden werden durch die Kontaktkraft wieder auf das Compound gedrückt. Der Widerstand des polymeren Strombegrenzers entspricht zu diesem Zeitpunkt wieder dem Compoundwiderstand (ca. $100\text{ m}\Omega$). Strom, Leistung und Volumenstrom an Zersetzungsgas steigen erneut an und führen zu einem wiederholten Abheben und

späteren Wiederaufsetzen der Elektroden auf das Compound. Der jetzt feststellbare Compoundwiderstand liegt bei über $200\text{ m}\Omega$. Man erhält auf diese Art und Weise nach jedem Aufsetzen der Elektroden eine Information über den Compoundwiderstand. Somit kann dem PTC-Effekt in etwa der grau dargestellte Anteil am Gesamtwiderstand zugeordnet werden. Der restliche und damit der bei diesem Schaltversuch größere Anteil ist dem Oberflächeneffekt zuzuordnen.

Um diesen Ansatz an einem weiteren Beispiel zu erläutern wird der Schaltversuch 10206 betrachtet (Abb. 67).

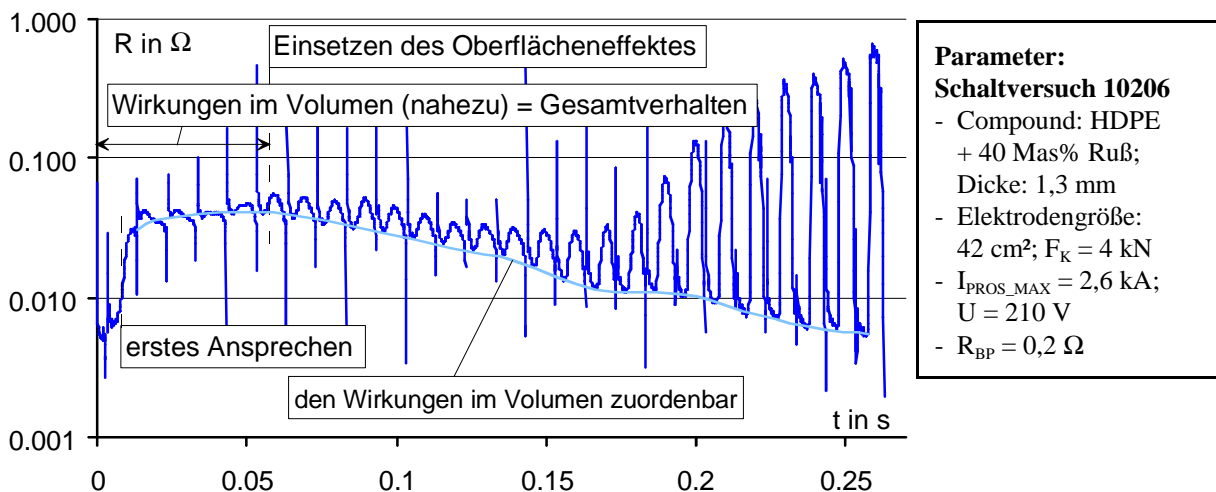


Abb. 67: Widerstandsmessschrieb des Schaltversuchs 10206

Die Stromflussdauer wurde so hoch gewählt, dass es im Zuge des Versuchs zu einer nahezu kompletten Zersetzung des Compounds gekommen ist. Aus der Abbildung 67 ist erkennbar, dass für $t < 61\text{ ms}$ das Verhalten des polymeren Strombegrenzers von den Wirkungen in den

oberflächennahen Compoundbereichen und von den Wirkungen im Volumen bestimmt wird. Das erste Ansprechen erfolgte nach 8,5 ms in Folge des PTC-Effekts. Bei $t = 61$ ms ist zum ersten Mal im deutlichen Umfang das Einsetzen der Grenzflächenwirkung zu erkennen. Die oberflächennahen Compoundbereiche sind hier bis zur Zersetzungstemperatur erwärmt und die im polymeren Strombegrenzer umgesetzte Leistung hat den kritischen Wert von ca. 55 kW überschritten, so dass ein zum Abheben der Elektroden genügend großer Volumenstrom an Zersetzungsgas entsteht. Je größer der Materialverlust im weiteren Verlauf des Schaltversuchs ist und desto niedriger damit die Kontaktkraft wird, desto größer ist das Abheben der Elektroden und der damit verbundene Widerstandsanstieg. Nachfolgend soll der Bereich zwischen 200 ms und 230 ms Versuchsdauer etwas näher betrachtet werden (Abb. 68).

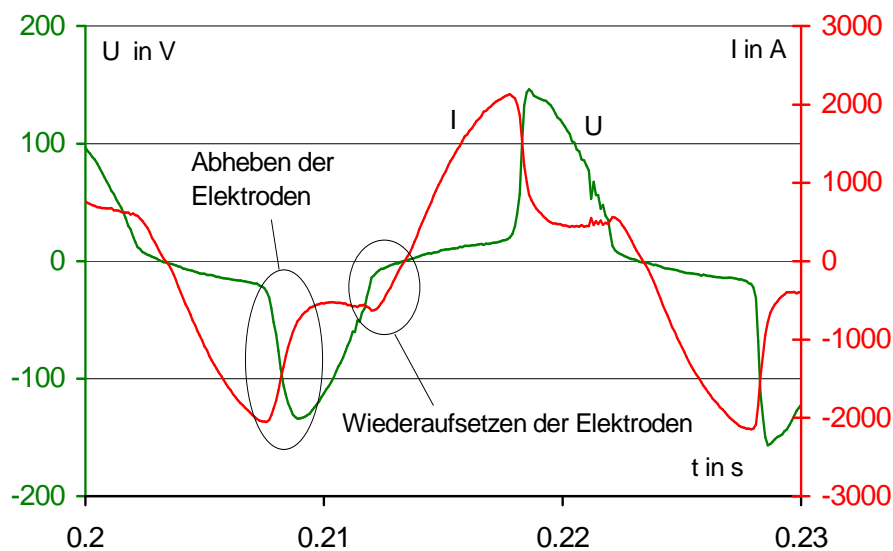


Abb. 68: Wiederholtes Abheben und Wiederaufsetzen der Elektroden eines polymeren Strombegrenzers in Folge Wechselstrombeanspruchung

Zu Beginn einer jeden Stromhalbwellen besitzt der polymere Strombegrenzer in Folge der fortgeschrittenen Erwärmung und somit des fortgeschrittenen NTC-Effekts sowie Materialabbrands einen Widerstand ($8 \text{ m}\Omega$) der nur wenig über dem Kaltwiderstand ($5 \text{ m}\Omega$) liegt. Mit ansteigendem Strom nimmt die im polymeren Strombegrenzer umgesetzte Leistung zu. Wird die kritische Leistung (ca. 55 kW) überschritten, kommt es zum Abheben der Elektroden, was mit einem Widerstandsanstieg auf ca. $250 \text{ m}\Omega$ verbunden ist. Unterschreitet die Leistung den kritischen Wert, sinkt die Entstehung von Zersetzungsgas soweit, dass das zwischen den abgehobenen Elektroden und dem Compound befindliche Gaspolster abströmt. Die Elektroden werden, bedingt durch die Kontaktkraft wieder auf das Compound gedrückt. Zu erkennen ist dieser Vorgang an dem Rückgang des Widerstands auf einen Wert in der Größenordnung von $8 \text{ m}\Omega$. Im Spannungsmessschrieb erkennt man ein plötzliches Absinken auf einen Wert nahe Null

und im Strommessschrieb ein nochmaliges kurzes Ansteigen unmittelbar vor dem Nulldurchgang. Mit der nächsten Halbwelle beginnt der Vorgang von Neuem.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es zwei Möglichkeiten zur Unterscheidung der Auswirkungen des Oberflächeneffekts von denen des PTC-Effekts gibt:

1. Auswertung der Minimums im $R(t)$ -Messschrieb und
2. Auswertung der Änderungen der Widerstandsanstiege im $R(t)$ -Messschrieb.

Während das zweite Verfahren insbesondere bei größeren Ansprechzeiten Verwendung findet, ist das erste für schnellere Vorgänge sowie für Wechselstrom geeignet.

6.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse zum Widerstandsverhalten

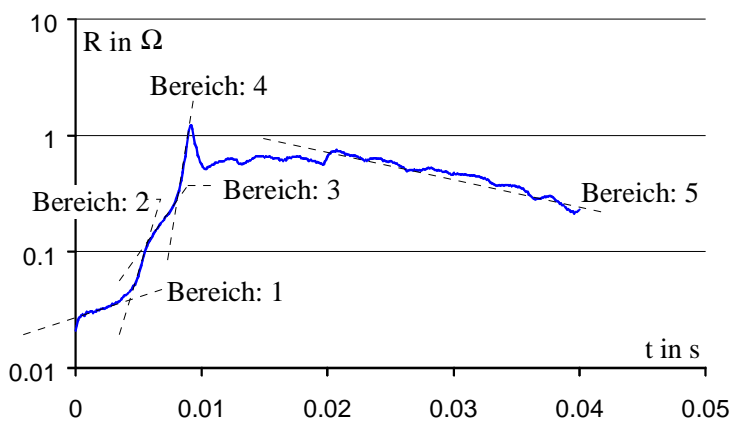


Abb. 69: Widerstandsmessschrieb des Schaltversuchs 80506

Mit den hergeleiteten Vorstellungen zur Wirkung von polymeren Strombegrenzern bei Hochstrombelastung wird, um eine Zusammenfassung zu geben, das Gesamtverhalten an Hand des im Abschnitt 6.3 vorgestellten Schaltversuchs 80506 erläutert (Abb. 69).

Der im Abschnitt 6.3 vorgenommenen Unterteilung des Gesamtverhaltens in Bereiche können wie folgt Wirkungen zugewiesen werden:

- 1: - Widerstandsanstieg im Volumen und der oberflächennahen Schicht in Folge Erwärmung im Durchgangsbereich
 - Widerstandsanstieg in der oberflächennahen Schicht wegen des Überschreitens der Sprungtemperatur (oberflächennaher PTC-Effekt)
- 2: - Widerstandsanstieg im Volumen wegen Überschreitens der Sprungtemperatur in Compoundbereichen, welche sich direkt zwischen Gebieten höherer Berührungsstellendichte befinden (Volumen-PTC-Effekt)
- 3: - Widerstandsanstieg im Volumen in Folge Überschreitens der Sprungtemperatur in Compoundbereichen, welche sich nicht direkt zwischen Gebieten höherer Berührungsstellendichte befinden (Volumen-PTC-Effekt, Stromkommutierung)
- 4: - Erwärmung in der oberflächennahen Schicht des Compounds bis zur Zersetzungstemperatur, Überschreitung der Entstehung eines kritischen Volumenstroms an

Zersetzungsgas, Widerstandsanstieg durch Abheben der Elektroden vom Compound (Oberflächeneffekt)

- 5: - Widerstandsabsinken durch Compounderwärmung bis weit in den Sperrbereich hervorgerufen durch die Selbstagglomeration der Füllstoffteilchen (NTC-Effekt)
- Widerstandsabsinken durch Compoundabbrand

Allen Schaltversuchen gemein ist der Bereich 1. Wird die Stromflussdauer genügend lange aufrecht erhalten, gilt das gleiche für Bereich 5. Das restliche Verhalten ist bei den 136 A -, 266 A - und 454 A - Schaltversuchen (siehe Abbildung 56) durch die Bereiche 2 und 3 geprägt. Bei prospektiven Stromstärken von größer als 760 A wird zusätzlich der Bereich 4 sichtbar. Mit steigender Stromstärke gewinnt dieser an Dominanz. Sind bei dem 915 A-Schaltversuch die Bereiche 2 und 3 noch deutlich von 4 zu unterscheiden, ist dies bei dem 1320 A-Schaltversuch sowie bei dem Schaltversuch 20523 (Abb. 55) kaum noch bzw. nicht mehr möglich. Somit ist mit steigender Stromstärke und damit kürzer werdenden Ansprechzeiten mit einer zunehmenden Überlagerung der Bereiche 2, 3 und 4 zu rechnen. Des weiteren ist, wie die Betrachtungen zum Schaltversuch 20523 zeigen (Abschnitt 6.4.3.4, Abb. 66), eine Verlagerung des Hauptenergieumsatzes beim Ansprechen in die Grenzschicht (Bereich 4) zu beobachten. Dies hat, bedingt durch die nachfolgende Strombegrenzung und der damit verbundenen verzögerten Erwärmung des Volumens, eine Verzögerung des Auftretens der hinter den Bereichen 2 und 3 stehenden Wirkungen zur Folge. So ist es, in Abhängigkeit des prospektiven Stroms und des Einschaltwinkels, durchaus möglich, dass ein Strombegrenzungsvorgang stattfindet ohne, dass es zu einer wesentlichen Wirkung im Volumen gekommen ist (Schaltversuch 20511, Abb. 76). Das Nichtvorhandensein des Bereichs 4 bei prospektiven Stromstärken von kleiner als 760 A bedeutet jedoch nicht, dass bei diesen Schaltversuchen kein Abbrand verzeichnet wird. Auch hier kommt es zum Erreichen der Zersetzungstemperatur in der oberflächennahen Schicht des Compounds. Die Stromflussdauer wurde bei den 136 A und 266 A - Schaltversuchen so groß gewählt, dass es fast zur kompletten Zersetzung des Compounds gekommen ist. Im Gegensatz zu den Schaltversuchen bei prospektiven Strömen von größer als 760 A wurde hier jedoch der zur Überwindung der Kontaktkraft notwendige Mindestvolumenstrom an Zersetzungsgas nicht erreicht. Der zum Erreichen des Mindestvolumenstroms notwendige Wert der Leistung beträgt bei dieser Konfiguration ca. 45 kW.

6.6 Wichtung der den einzelnen Wirkungen zuordenbaren Widerstandsanstiege

Der Kaltwiderstand (R_0) der für die Schaltversuche 80501 - 80508 (Abb. 56) verwendeten Compound-Probekörper streut im Bereich von 22 m Ω bis 35 m Ω . Wertet man die Änderung der Widerstandsanstiege in den R(t)-Messschrieben aus, lassen sich die folgenden Anteile den einzelnen Bereichen (siehe Abb. 57) zuordnen:

Bereich 1: 6 m Ω ... 51 m Ω (entsprechen 0,21 ... 1,7 $\cdot R_0$),

Bereich 2: 15 m Ω ... 191 m Ω (entsprechen 0,52 ... 6,4 $\cdot R_0$),

Bereich 3: 16 m Ω ... 526 m Ω (entsprechen 0,57 ... 18 $\cdot R_0$) und

Bereich 4: 0 m Ω ... 1923 m Ω (entsprechen 0 ... 69 $\cdot R_0$).

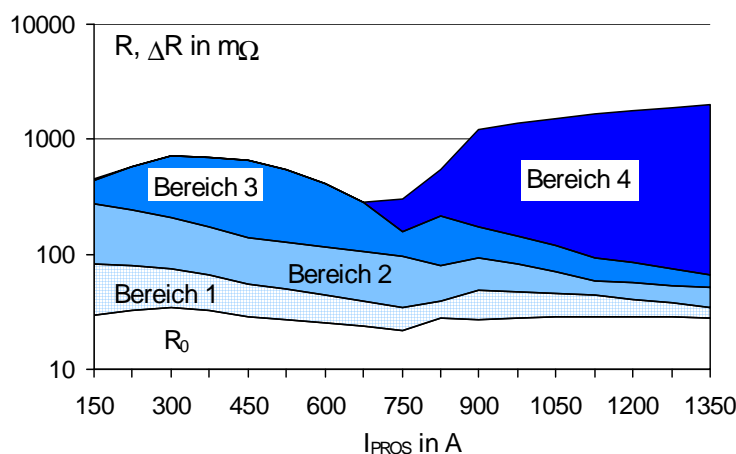


Abb. 70: Abhängigkeit des den Wirkungen zuordenbaren Widerstandsanstiegs von dem prosp. Strom

Allgemein kann festgestellt werden, dass mit dem Anwachsen des Stroms die den Bereichen 1, 2 und 3 zuordenbare Widerstandszunahme geringer und die dem Bereich 4 zuordenbare Widerstandszunahme größer wird (Abb. 70). Für das Auftreten des Bereichs 4 wird eine bestimmte Mindestleistung benötigt, deswegen

bestimmen bei niedrigen prospektiven Strömen die auf dem PTC-Effekt beruhenden Wirkungen das Gesamtverhalten des polymeren Strombegrenzers. Nach dem Überschreiten der kritischen Leistung gewinnt der Oberflächeneffekt mit dem weiteren Anstieg des prospektiven Stroms sehr rasch an Dominanz über das Gesamtverhalten. Die den Bereichen 1 ... 3 (PTC-Effekt) zuordenbaren Widerstandsanstiege sind dann bedeutend geringer als der dem Bereich 4 (Oberflächeneffekt) zuordenbare. Anzumerken ist jedoch, dass es nach dem Eintreten des Oberflächeneffekts noch zu einer weiteren dem PTC-Effekt zurechenbaren Widerstandszunahme kommen kann (siehe dazu auch 6.4.3.4), die bei der Auswertemethode der Änderungen der Widerstandsanstiege im Bereich 4 untergeht.

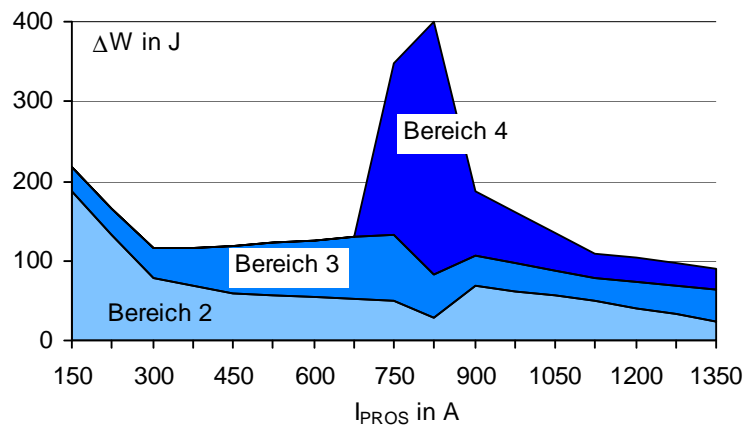


Abb. 71: Abhängigkeit der bis zum Auftreten einer Wirkung notwendigen Schaltarbeit vom prosp. Strom

Mit der Zunahme des prospektiven Stroms wird eine Abnahme der bis zum Auftreten des nächsten Bereichs geleisteten Schaltarbeit beobachtet (Abb. 71). Somit ist auch verständlich, warum mit der Zunahme des prospektiven Stroms eine Abnahme der den Bereichen 1 ... 3 zuordenbaren Widerstandsanstiege verbunden ist. Die

Ursache für die Abnahme der bis zum Übergang in den nächsten Bereich geleisteten Schaltarbeit mit der Zunahme des Stroms, liegt bei der Beeinflussung der Bereiche 1 ... 3 durch die dem Bereich 4 zugrundeliegende Wirkung. Die Grundlage für den Bereich 4 (Oberflächeneffekt) wird bereits im Bereich 1 (oberflächennaher PTC-Effekt) gelegt. Der mit dem Einsetzen des Oberflächeneffekts verbundene Widerstandsanstieg, welcher zur Strombegrenzung führt, bewirkt eine Verzögerung des Fortschreitens der Wirkungen 1 bis 3. Des weiteren ist jedoch auch mit dem Anstieg des prospektiven Stroms ein Absinken der eingebrachten Schaltarbeit bis zum Auftreten des Bereichs 4 zu beobachten. Die Ursache hierfür liegt darin, dass es in den Bereichen höchster Berührungsstellendichte (entsprechend Bereichen höchster Stromdichte) zuerst zur Compoundzersetzung kommt. Die Frage ist nun, ob der von den an der Oberfläche sich befindenden Seen geschmolzenen Compounds, welche bis zur Zersetzungstemperatur erwärmt sind, ausgehende Volumenstrom an Zersetzungsgas ausreicht, um eine Elektrodenabhebung zu bewirken. Dies ist eine Frage der zu diesem Zeitpunkt umgesetzten Leistung. Reicht der Gasstrom nicht aus, wird in weiteren Gebieten die Zersetzungstemperatur erreicht. Die nun notwendige Leistung zur Bereitstellung des kritischen Volumenstroms an Zersetzungsgas ist geringer als zu einem früheren Zeitpunkt. Deshalb wird bei steigendem prospektiven Strom bis zum Auftreten des Bereichs 4 eine Abnahme der notwendigen Schaltarbeit und eine Zunahme der im Compound umgesetzten Leistung beobachtet. So beträgt die bis zum Erreichen des Bereichs 4 notwendige Schaltarbeit bei dem 760 A - Schaltversuch 347 J, bei dem 1320 A - Schaltversuch hingegen lediglich 91 J. Im Gegenzug wird eine Zunahme der zum Zeitpunkt des Eintretens des Bereichs 4 beobachteten Leistung von 43 kW auf 74 kW registriert.

6.7 Spezielle Untersuchungen zum Stromübergang zwischen Compound und Elektrode beim Oberflächeneffekt

Wie in der Abbildung 64 schematisch dargestellt, kommt es in Folge des Überschreitens eines kritischen Volumenstroms an Zersetzungsgase zum Abheben der Metallelektroden vom Compound. Verbunden ist dieser Vorgang mit einer starken Zunahme des Widerstands des polymeren Strombegrenzers. Da keine direkte Verbindung zwischen dem Metall und dem Compound mehr besteht, der Stromfluss jedoch nicht Null wird, ist die Frage zu stellen, wie der Strom von der Elektrode zum Compound gelangt. Der klassischen Kontakttheorie zur Folge ist mit der Trennung zweier Kontaktstücke bei der Explosion der letzten Kontaktbrücke zwangsläufig die Entstehung eines Lichtbogens verbunden. Die Anwendung dieser Theorie weist jedoch Makel bei der Erklärung der Beobachtungsergebnisse im Zusammenhang mit dem Abheben der Elektrode vom Compound auf.

6.7.1 Indizien und Beschreibung der Phänomene

a. Spannungsbedarf

Während des ersten Ansprechens sind - ohne dass es zu einer Zerstörung des Compounds kommt - Spannungen bis 700 V zu beobachten. Bei einer Elektrodengröße von 40 cm² wird dabei ein Anstieg der Kontaktkraft von bis zu 8 kN beobachtet. Die Federkonstante der verwendeten Federelemente liegt bei 18 N/μm. Hieraus folgt (vorbehaltlich der Ausführungen im A10) eine Abhebung von maximal 400 μm. Da insbesondere bei größeren Strömen das erste Ansprechen durch die Wirkung an der Grenzfläche dominiert wird, ergibt sich abzüglich des Anoden- und Kathodenfalls eine Lichtbogenfeldstärke von größer als 1,5 kV/mm! Lichtbogenfeldstärken dieser Größenordnung sind selbst unter extremen Drücken oder bei extremer Kühlung nicht gemessen worden. Laut [1] werden selbst bei durch chemische Treibladungen erzeugten sehr starken Ölströmungen nur Feldstärken bis 150 V/mm beobachtet. Bei einem frei in Luft brennenden Bogen liegt die Säulenfeldstärke in der Größenordnung von 1,5 V/mm.

b. Spannungsanstieg

Aus dem Bereich der Metallkontakte ist bekannt, dass mit der Trennung der Kontaktstücke bei der Explosion der letzten Kontaktbrücke in Folge der Entstehung eines Lichtbogens eine plötzliche Zunahme des Spannungsabfalls zu verzeichnen ist. Die Spannungsbedarf eines Lichtbogens setzt sich aus dem Anoden- und Kathodenfall sowie der Säulenspannung zusammen. Unmittelbar nach der Explosion der letzten Kontaktbrücke kann die Entfernung zwischen Anode und Kathode vernachlässigt werden. Die Lichtbogen Spannung setzt sich hier nur aus dem

Anoden- und Kathodenfall zusammen. Der Spannungsabfall über dem Kathodengebiet liegt bei 10 V [1] / 10 ... 15 V [2], der über dem Anodengebiet bei 40 ... 1 V [1] / 10 ... 2 V [2]. Der konkrete Wert dieser Spannungsabfälle wird vom Kontaktmaterial sowie von der Stromstärke bestimmt, wobei der kleinere Wert beim Anodenfall für größere Stromstärken gilt. Der unmittelbar nach der Explosion der letzten Kontaktbrücke zu beobachtende Spannungsanstieg wird als Lichtbogeneinsatzspannung bezeichnet und setzt sich aus der Summe von Kathoden- und Anodenfall zusammen.

Über Metall-Compound-Kontakte liegen bisher keine gesicherten Erkenntnisse vor, weshalb wiederum ein Experiment den Sachverhalt klären soll:

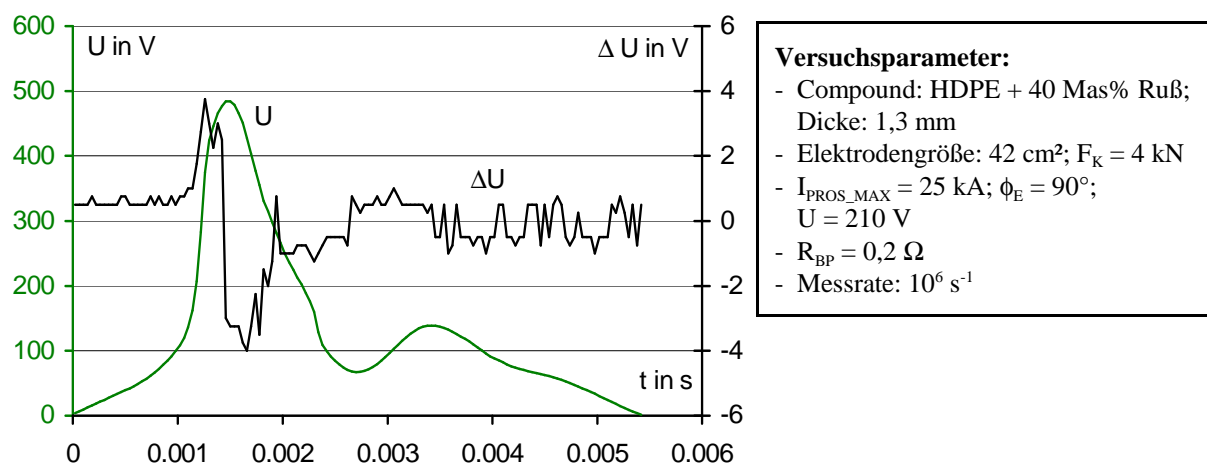


Abb. 72: Spannungsdifferenz von jeweils benachbarten Messpunkten bei einer Messfrequenz von 10^6 s⁻¹

Die Messrate beträgt bei diesem Versuch 10^6 s⁻¹. Trotz der hohen vermeintlichen Lichtbogenfeldstärke überschreitet der Betrag der Spannungsdifferenz von Mess- zu Messpunkt nicht 4 V (Abb. 72). Es ist keine Lichtbogeneinsatzspannung die üblicherweise in der Größenordnung von 15 V liegt zu beobachten.

c. Fußpunktspuren

Der hohe Energieumsatz bezogen auf eine Raumeinheit im Fußpunkt eines Lichtbogens führt zur Aufschmelzung der Elektrodenmaterialien in diesen Punkten. Unter dem Einfluß des eigenen oder eines fremden magnetischen Felds kommt es zur Lichtbogenwanderung. Somit hinterläßt ein Lichtbogen auf dem Elektrodenmaterial eine die Anode und Kathode charakterisierende Spur. Das Compound weist, bedingt durch die Zersetzung des Matrixmaterials (bei PE ab Temperaturen über 250 °C) Abbrandstellen auf. Somit ist die Suche nach Fußpunktspuren auf dem Compound wenig sinnvoll. Aber auch auf den Metallelektroden, sind die sonst üblichen Fußpunktspuren nicht erkennbar.

d. Lichterscheinung

In [18] berichtet man im Zuge der Hochstrombelastung eines polymeren Strombegrenzers von einer Lichterscheinung. Da von einem Abheben der Elektroden ausgegangen wird, schlussfolgert man, dass es sich hierbei um einen Lichtbogen handelt. Mit Hilfe der bei der Firma Moeller GmbH Bonn durchgeführten Hochgeschwindigkeitsvideoaufzeichnungen (Anhang 11) von Hochstrombelastungen kann jedoch gezeigt werden, dass der überwiegende Teil dieser Lichterscheinung von der Verbrennung des ausgestoßenen Gemischs aus Zersetzungsgas und Ruß nach dem Kontakt mit Luftsauerstoff herrührt. Die Stromstärke ist zu diesem Zeitpunkt bereits Null.

Aus dem Zeitlupenfilm ist zum Zeitpunkt des Leistungsmaximums eine auf den Bereich der Elektroden begrenzte, weitere Lichterscheinung zu beobachten. Das Intensitätsmaximum dieser Lichterscheinung kommt zwar in die Größenordnung des Verbrennungsvorgangs, jedoch ist die Dauer auf das unmittelbare Leistungsmaximum beschränkt (ca. 300 μ s).

Ein Ansatz zur Erklärung des Stromflusses von der abgehobenen Elektrode zum Compound sowie zur Ursache der Lichterscheinung im Bereich des Leistungsmaximums wird im Abschnitt 6.7.3 vorgestellt.

6.7.2 Untersuchung der Leitfähigkeit der ausgestoßenen Gase

Mit einer Gitteranordnung entsprechend [48] ist es möglich leitfähige Gase zu detektieren. Der in diesem Zusammenhang realisierte Versuchsaufbau ist im Anhang 12 dargestellt.

Wird bei einem Einschaltwinkel ϕ_E von 60° eine normale Funktion eines polymeren Strombegrenzers registriert, kann das folgende Verhalten beobachtet werden (Schaltversuch 170902: Abb. 73).

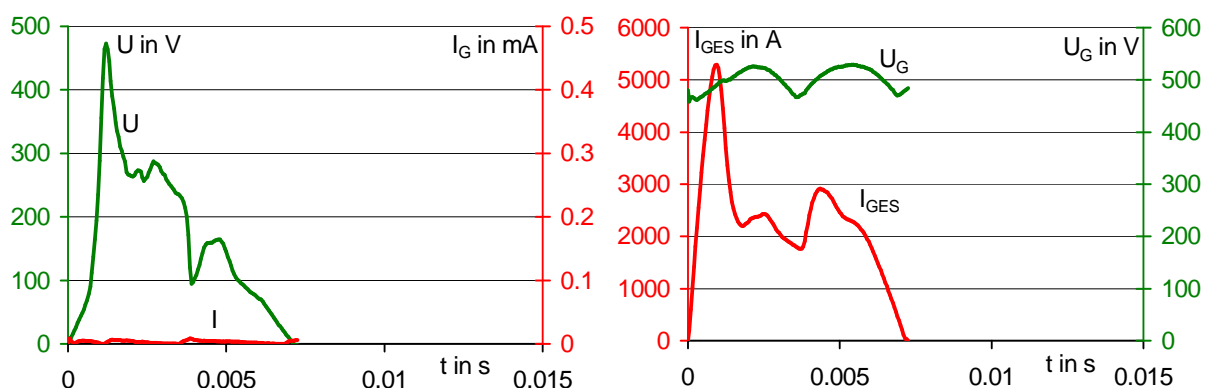


Abb. 73: Normale Funktion eines polymeren Strombegrenzers: keine leitfähigen Gase zu beobachten

Es ist faktisch keine Leitfähigkeit der ausgestoßenen Ruß-Zersetzungsgasgemischwolke festzustellen. Die Ausschläge des Gitterstroms I_G bis auf Werte von $7\ \mu\text{A}$ sind auf Unzulänglichkeiten des Messaufbaus zurückzuführen. Die Welligkeit in der Gitterspannung U_G rührt von der verwendeten Gleichspannungsquelle - einer 6-Puls-Brücke - her.

Kommt es demgegenüber zu einer fehlerhaften Funktion des Probekörpers, ist ein Verhalten analog dem nachfolgend dargestellten zu beobachten (Schaltversuch 170904: Abb. 74):

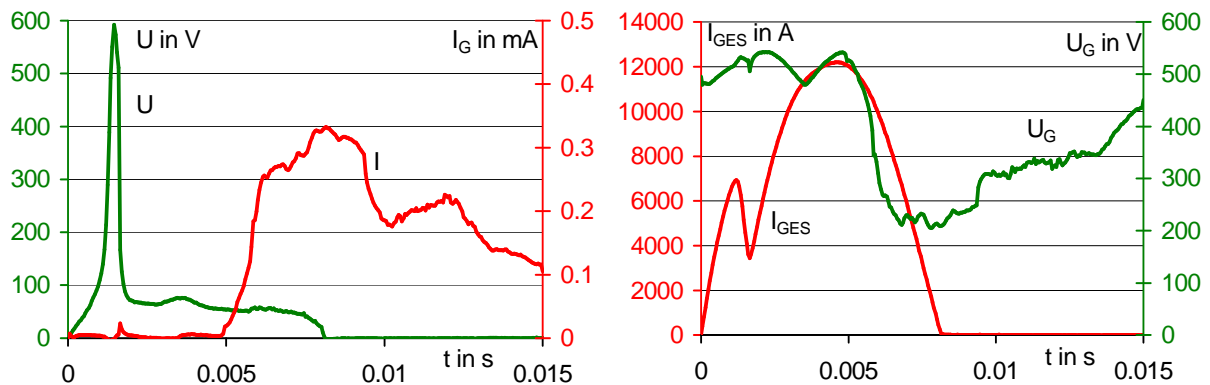


Abb. 74: Fehlerhafter polymerer Strombegrenzer: Beobachtung leitfähiger Gase

Betrachtet man den Prüfling nach dem Schaltversuch kann festgestellt werden, dass sich nur noch Bruchstücke des Compounds zwischen den Elektroden befinden. Die Elektroden weisen Löcher auf bzw. sind miteinander verschweißt. Im Spannungsmessschrieb (Abb. 74) erkennt man bis zum Spannungsmaximum die normale Funktion des polymeren Strombegrenzers (vergleiche Abb. 73). Danach ist jedoch ein plötzlicher Einbruch festzustellen. Es ist zum Bruch des Compoundplättchens gekommen. Die Ursache hierfür wird im Abschnitt 7.3 dargelegt. Es kommt zum explosionsartigen seitlichen Herausschieben der Compoundbruchstücke. Unter der Einwirkung der Kontaktkraft werden die Elektroden aufeinander gedrückt. Dies führt zum Kurzschluss zwischen den Elektroden und zum sofortigen Wiederanstieg des Stroms. Hierbei kann ein Lichtbogen gezündet werden. An dem Anstieg des Gitterstroms sowie dem Absinken der über dem Gitter messbaren Spannung ist die Passage der vom Lichtbogen ausgehenden Plasmawolke zu beobachten. Es ist zu erkennen, dass zwischen der Zündung des Lichtbogens (1,6 ms) und dem Beginn der Passage der Plasmawolke durch das Gitter (5,1 ms) ein zeitlicher Verzug vorhanden ist. Unter Kenntnis der Lichtbogenposition kann hieraus die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Weiterhin gut erkennbar ist der über die Stromflusszeit des Hauptstromkreises hinaus andauernde Abströmvorgang des Plasmas.

Insgesamt wurden zur Untersuchung der Leitfähigkeit der ausgestoßenen Gaswolke 30 Schaltversuche an 7 verschiedenen Probekörpern durchgeführt. Es wurde die Erkenntnis

gewonnen, dass ein Lichtbogen nur bei fehlerhafter Funktion (nach Zerbersten des Probekörpers) auftritt. Bei normaler Funktion findet Elektrodenabhebung mit Stromleitung ohne Lichtbogen statt.

6.7.3 Spezielle Untersuchung der Stromleitung in einem Ruß-Zersetzungsgas-Gemisch

Zur Beantwortung der Frage nach der Stromleitung bei Kontaktabhebung wurden weitere Überlegungen angestellt.

6.7.3.1 Arbeitshypothese

Unter Anwendung der Perkolationstheorie soll im Folgenden ein Ansatz zur Erklärung der Stromleitung durch das Ruß-Zersetzungsgas-Gemisch gegeben werden. Gemäß der Perkolationstheorie existiert eine kritische Konzentration an Füllstoff in einem Matrixmaterial ab der durchgehende leitfähige Pfade beobachtet werden. In Folge der Wirkungen an der Grenzfläche zwischen Compound und Metallelektrode kommt es zur thermischen Zersetzung des Compoundmaterials. Dabei werden verschiedene Kohlenwasserstoffe (Zersetzungsprodukte des Matrixmaterials) sowie Ruß (Füllstoff) im Bereich zwischen Elektrode und Compound freigesetzt. Da dieses Gemisch in Folge seiner hohen Strömungsgeschwindigkeit einen turbulenten Charakter aufweist, wird von einer guten Durchmischung des Rußes mit den Kohlenwasserstoffen auszugehen sein. Es wäre somit zu vermuten, dass es sich bei diesem Gemisch um ein Zwei-Komponenten-System handelt, auf welches - analog eines PE-Ruß-Gemischs - die Perkolationstheorie anwendbar ist. Somit würde auch im Fall des Gemischs aus Zersetzungsgas und Ruß eine Füllstoffkonzentration existieren, ab der eine Leitfähigkeit zu verzeichnen wäre. Diese Leitfähigkeit beruht auf dem Leitfähigkeitsmechanismus der Füllstoffteilchen, welche sich untereinander berühren. Im Fall von Ruß liegt somit auch beim Gemisch mit dem Zersetzungsgas eine Elektronenleitfähigkeit durch die sich einander berührenden Rußpartikel vor. Eine Ionisation des Zersetzungsgases ist zum Zustandekommen dieser Leitfähigkeit nicht notwendig.

Der Widerstand der Strecke aus Rußpartikeln und Zersetzungsgas liegt in der Größenordnung einiger 100 m Ω . Er kann sogar Werte bis in den Ω -Bereich hinein erreichen. Da der Strom in einem Stromkreis mit induktivem Charakter seinen Wert nicht sprunghaft ändern kann, kommt es unmittelbar nach dem ersten Ansprechen zu einer ausgeprägten Leistungsspitze (Abschnitt 7.3). Dies führt dazu, dass der sich im Zwischenraum zwischen Compound und abgehobener Elektrode befindliche Ruß stark erwärmt und für den Zeitraum der Leistungsspitze zum hellen Glühen

kommt (Anhang 11, Abb. 118).

6.7.3.2 Ruß-Zersetzungsgas-Gemisch als Medium

Um den Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit des Ruß-Zersetzungsgas-Gemischs und dem Rußgehalt zu ermitteln, werden die folgenden Experimente vorgenommen. Der Ruß ist dabei in einem dem gasförmigen Zersetzungsprodukten ähnlichem Medium so zu dispergieren, dass es im Versuchszeitraum zu keiner das Versuchsergebnis beeinflussenden Sedimentation kommt. Als Ersatzstoff für das Zersetzungsgas ist die Verwendung von Luft naheliegend. Zur Untersuchung des Gemischs aus Luft und Ruß kommt die im Anhang 5 vorgestellte Versuchseinrichtung zum Einsatz. Ermittelt wird der Zusammenhang zwischen dem Volumen eines Gemischs aus Luft sowie einer bekannten Menge an Ruß und der elektrischen Leitfähigkeit. Dieser Messung kommt die niedrige Schüttdichte des Rußes entgegen. Damit war es möglich Konzentrationen des Rußes bis hinab zu 10 Vol% zu realisieren. Um diesen Bereich untersuchen zu können, wurden als Ersatzstoffe für das Zersetzungsgas Silikonöl und Petroleum verwendet (siehe Anhang 13). Füllstoffkonzentrationen von größer als 20 Vol% sind für die Beurteilung der Leitfähigkeit des Ruß-Zersetzungsgas-Gemischs nicht relevant.

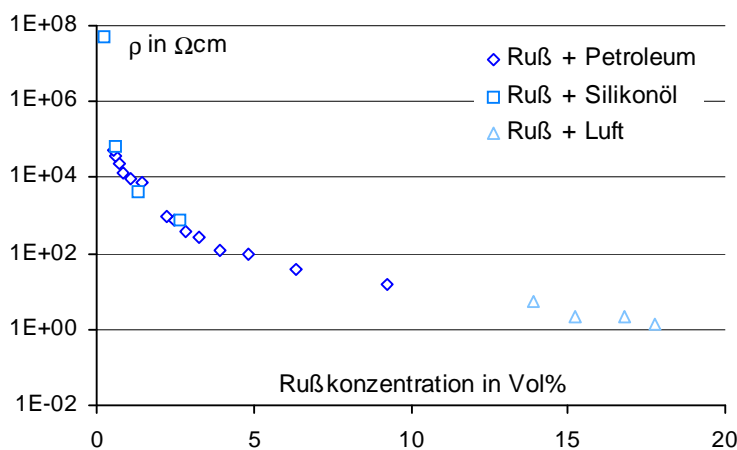


Abb. 75: Leitfähigkeit von Rußdispersionen

Es ist festzustellen, dass sich die einzelnen Messreihen, die einen Konzentrationsbereich von 0,2 Vol% bis 20 Vol% überstreichen, gegenseitig gut ergänzen (Abb. 75). Eine Perkolationsschwelle analog der Kunststoffe wird nicht beobachtet. Grund hierfür ist die niedrige Viskosität der Matrix. Für den Füllstoff

bestehen somit sehr gute Voraussetzungen zur Agglomeration und somit zu einem Absinken der Perkolationsschwelle auf sehr niedrige Werte.

6.7.3.3 Ergänzende Abschätzungen aus Abbrandversuchen

Um die Vermutung des Stromübergangs mittels Elektronenleitung zwischen abgehobener Metallelektrode und Compound über die Rußteilchen im Zersetzungsgas zu untermauern, werden die folgenden beiden Betrachtungen angestellt. Auf der Grundlage experimentell ermittelter

Daten wird die Rußkonzentration im Zwischenraum von abgehobener Elektrode und Compound abgeschätzt. Die Abschätzung der Rußkonzentration erfolgt

- mittels des der Grenzflächenwirkung zuordenbaren Widerstands und
- über die Abbrandmenge.

Den experimentellen Hintergrund für diese Betrachtungen bildet der Schaltversuch 20511 (Abb. 76). Um zu gewährleisten, dass der gesamte während des Schaltversuchs auftretende Abbrand von einer Abhebung stammt, wurde für ein Einschaltwinkel von 120° gewählt. Bei dieser späten Einschaltphasenlage kommt es im Gegensatz zu Schaltversuchen

mit früherem Einschaltwinkel bei den gegebenen Versuchsparametern nur zu einem einmaligen Ansprechen.

Parameter: Schaltversuch 20511

- Compound: HDPE + 40 Mas% Ruß; Dicke: 1,3 mm
- Elektrodengröße: 39 cm^2 ; $F_K = 4 \text{ kN}$
- $I_{\text{PROS_MAX}} = 25 \text{ kA}$; $\phi_E = 120^\circ$; $U = 210 \text{ V}$
- kein Bypass

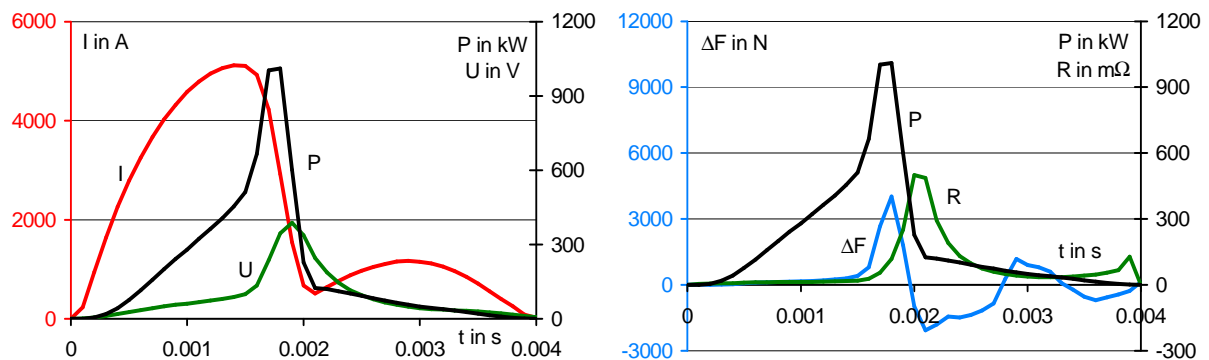


Abb. 76: Messschriebe des Schaltversuchs 20511

a. Grenzflächenwirkung

Das Leistungsmaximum tritt zwischen Strom- und Spannungsmaximum auf. Die durch den Grenzflächeneffekt bedingte Compoundzersetzung sowie der dadurch verursachte Anstieg der Kontaktkraft erreichen in diesem Punkt ebenfalls ihre höchsten Werte. Wegen der mechanischen Trägheit (siehe Anhang 10) wird das Maximum der Abhebehöhe der Elektroden vom Compound und der damit verbundene Höchstwert des Widerstands des polymeren Strombegrenzers wenig später durchschritten. Der Wert des Kraftmaximums beträgt 4000 N. Bei einer Federkonstante der beiden verwendeten Federelemente von insgesamt $18 \text{ N}/\mu\text{m}$ ergibt sich für beide Elektroden in Summa eine mittlere Abhebehöhe von $220 \mu\text{m}$. Der Widerstand des polymeren Strombegrenzers erreicht einen Maximalwert von $500 \text{ m}\Omega$. Der den Wirkungen im Volumen zuordenbare Widerstand liegt in der Größenordnung $30 \text{ m}\Omega$. Somit entfallen $470 \text{ m}\Omega$ auf den Oberflächeneffekt. Bei einer mittleren Abhebung von $220 \mu\text{m}$ und einer Elektrodenfläche von

42 cm² ergibt sich für die Leitfähigkeit des Ruß-Zersetzungsgas-Gemischs 900 Ωcm. An der Stelle der maximalen Abhebung folgt hieraus für die Rußkonzentration des Schaltversuchs 20511 ein Wert von 2,2 Vol%.

b. Abbrandmenge

Der Masseverlust an Compoundmaterial betrug bei dem oben dargestellten Schaltversuch 30 mg. Dies entspricht einem Volumen ($\rho_{\text{COMPOUND}} = 1,178 \text{ g/cm}^3$) von 25 mm³. Bei einer Rußkonzentration von 40 Mas% im Compound werden dementsprechend 12 mg Ruß freigesetzt. Dies entspricht einem Rußvolumen im Pyknometer von 5,5 mm³. Bei einer mittleren Abhebehöhe von 220 µm und einer Elektrodenfläche von 65 x 65 mm² zuzüglich der am Compound abgebrannten Menge ergibt sich ein Volumen von 955 mm³. Verteilt sich der Ruß homogen über dieses Volumen entspricht dies 0,6 Vol%.

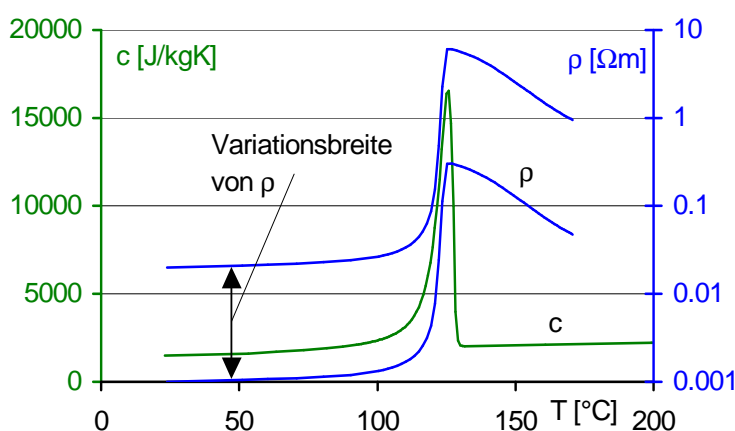
Zieht man in Betracht, dass die wirkliche Abhebehöhe wegen der mechanischen Trägheit geringer ist und der Ruß sich nicht homogen über das Volumen zwischen abgehobener Elektrode und Compound verteilt, wird die Differenz der beiden Betrachtungen verständlich. Die Größenordnung der Ergebnisse stützt die Vermutung, dass der Stromübergang zwischen Compound und Metallelektrode in Folge Elektronenleitung durch die sich einander berührenden Rußteilchen des Zersetzungsgas-Ruß-Gemischs und nicht durch einen Lichtbogen erfolgt.

7 Anwendungen

7.1 Aspekte der Dimensionierung

Die Eckpunkte der Dimensionierung eines polymeren Strombegrenzers sind durch das Strombegrenzungsverhalten und die Nennstromtragfähigkeit gegeben. Im Kurzschlussfall soll durch eine möglichst schnelle Widerstandserhöhung der Strom wirkungsvoll begrenzt werden. Die Widerstandserhöhung tritt bei den in dieser Arbeit betrachteten Strombegrenzern als Folge des Erreichens eines bestimmten Erwärmungszustands ein. Um diesen Zustand bei vergleichbarem Kurzschlussstrom in möglichst kurzer Zeit zu erreichen, sollte zum einen das Compoundvolumen so klein wie möglich und zum anderen der Kaltwiderstand des polymeren Strombegrenzers möglichst groß sein. Das widerspricht den Forderungen nach einer guten Stromtragfähigkeit. Um im Nennbetrieb den Übergang des Compounds in den Sperrbereich zu verhindern, eine hohe zulässige Umgebungstemperatur zu erlauben und die Verlustleistung zu gering wie möglich zu halten, sollte der Kaltwiderstand des polymeren Strombegrenzers so klein wie möglich sein. Dies ist nur durch die Verwendung einer großen Compoundfläche (und damit einem vergrößerten Compoundvolumen) sowie durch Compoundmaterial mit niedrigem spezifischen Durchgangswiderstand möglich.

Als Kriterium zur Beurteilung der Strombegrenzungsfähigkeit wird die Zeit bis zum Ansprechen gewählt (die Verwendung von Material, welches seinen Widerstand in ausreichendem Maße vergrößert, wird vorausgesetzt). Zur Ermittlung der Ansprechzeiten wird das im Anhang 9 vorgestellte Modell verwendet. Die Grenzschichtwirkung wird durch dieses Modell nicht berücksichtigt. Dennoch lassen sich damit - begründet durch die Ausführungen im Abschnitt 6.4.1 - für die Zeit bis zum Ansprechen und die dafür notwendige Schaltarbeit gute Ergebnisse erzielen.



Parameter zur Simulation:

- Compound: Dicke: 1 mm;
Dichte: 1180 kg/m³
- $I_{\text{PROS_MAX}} = 50 \text{ kA}$; $\phi_E = 30^\circ$;
 $\cos \phi = 0,2$
- $R_{\text{BP}} = 0,2 \Omega$; $T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$
- $Q = 2,5$

Abb. 77: Kennlinien des spez. Widerstands und der spez. Wärmekapazität für die Ermittlung der Ansprechzeiten

Für die temperaturabhängigen Größen $c(T)$ und $\rho(T)$ werden die aus Abschnitt 6.2.1 bekannten Kennlinien verwendet (Abb. 77). Ermittelt wird die Zeit bis zum Ansprechen in Abhängigkeit von der Größe sowie der Leitfähigkeit des Compounds. Eine Möglichkeit zur Variation der Leitfähigkeit ist wie im Abschnitt 4.2.2a dargestellt die Veränderung der Füllstoffkonzentration. Um dies in der Simulation zu berücksichtigen, wird die $\rho(T)$ -Kennlinie des HDPE + 40 % Ruß, die einen spezifischen Kaltwiderstand ρ_0 von $1,33 \Omega\text{cm}$ aufweist, für den zu betrachtenden Leitfähigkeitsbereich von $0,1 \dots 2 \Omega\text{cm}$ skaliert. Im geringeren Umfang hat die damit verbundene Rußkonzentrationsänderung auch Einfluss auf die Dichte und die $c(T)$ -Kennlinie des Compounds. Dies wird in diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Die Compoundgröße wird im Bereich von $10 \dots 100 \text{ cm}^2$ variiert.

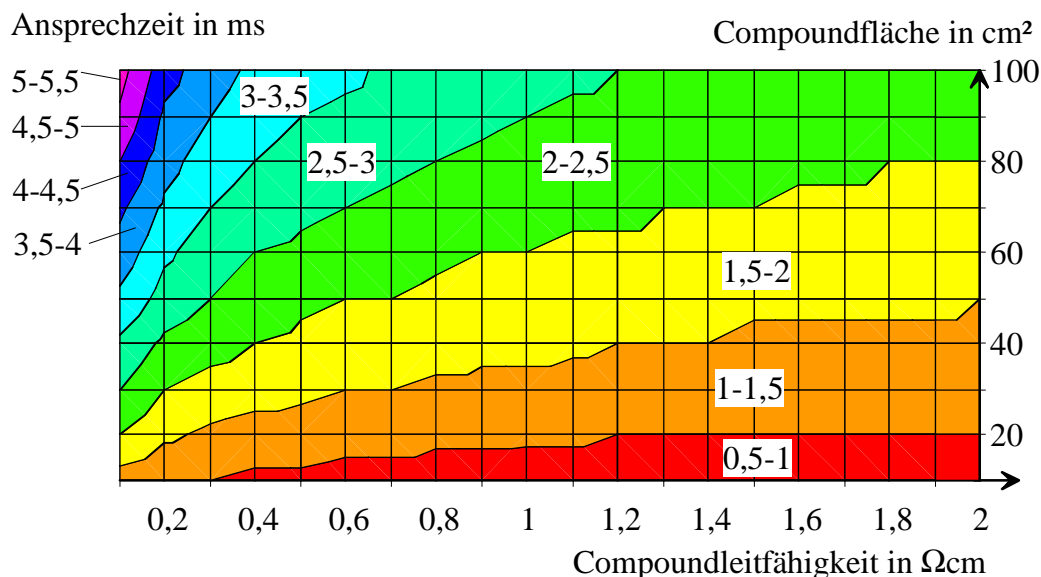


Abb. 78: Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Compoundgröße sowie -leitfähigkeit

Die sich ergebenden Ansprechzeiten liegen zwischen $0,7 \text{ ms}$ und $5,2 \text{ ms}$ (Abb. 78). Die kürzesten Zeiten und damit die beste Strombegrenzung wurden erwartungsgemäß bei kleinen Compoundflächen und großen spezifischen Widerständen beobachtet. Diese Kriterien stehen denen zum Erzielen einer hohen Stromtragfähigkeit im Nennbetrieb genau gegenüber. Es ist somit notwendig zwischen Stromtragfähigkeit und Strombegrenzungsverhalten einen Kompromiss zu schließen. Die Ermittlung der Werte für die Stromtragfähigkeit erfolgt mit Hilfe des in Anhang 14 dargestellten Modells. Variiert werden analog der Betrachtung im Kurzschluss die Compoundgröße im Bereich von $10 \dots 100 \text{ cm}^2$ und die Compoundleitfähigkeit zwischen $0,1 \Omega\text{cm}$ und $2 \Omega\text{cm}$.

Parameter zur Simulation: $T_0 = 23\text{ °C}$

- Compound: $Q = 2,5$; $\lambda_p = 0,9\text{ W/Km}$; $b_p \times l_p \times d_p = 0,065 \times 0,065 \times 0,001\text{ m}^3$
- Druckplatte (Pertinax): $\epsilon_G = 0,7$; $\alpha_G = 3\text{ W/Km}^2$; $\lambda_G = 0,35\text{ W/Km}$; $b_G \times l_G \times d_G = 0,065 \times 0,065 \times 0,005\text{ m}^3$
- Zuleitung (Kupfer): $\epsilon_L = 0,3$, $\alpha_L = 10\text{ W/Km}^2$, $\lambda_G = 394\text{ W/Km}$ und $A_Q = 6 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2$

Stromtragfähigkeit in A

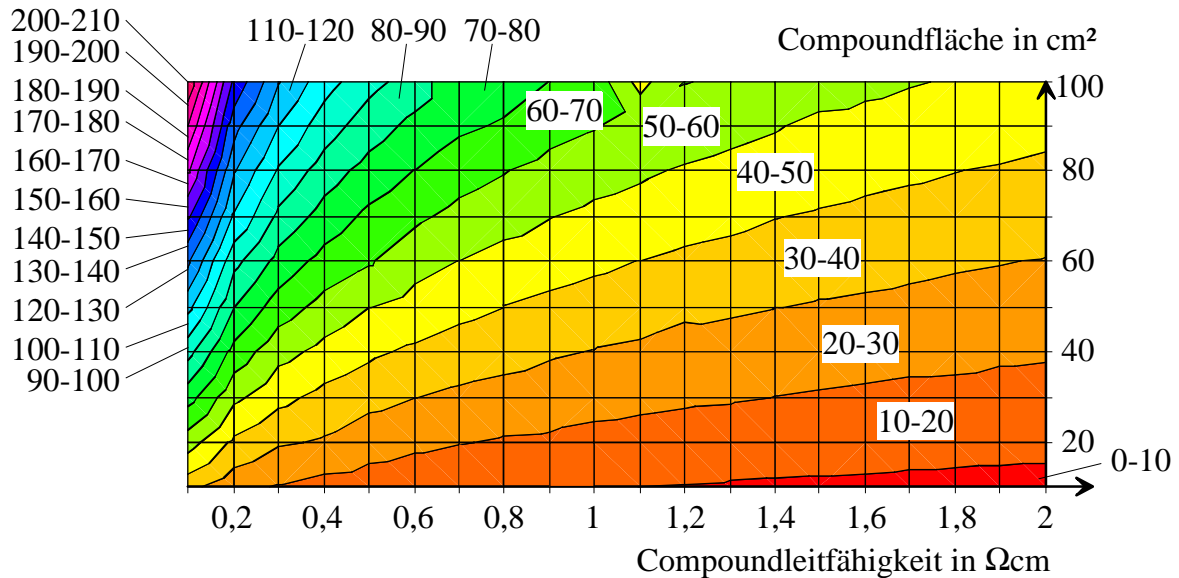


Abb. 79: Nennstromtragfähigkeit in Abhängigkeit von Compoundgröße und -leitfähigkeit

Wie schon vermutet, ist mit einer höheren Stromtragfähigkeit eine längere Ansprechzeit verbunden (Abb. 79). Auch wenn die beiden Kennlinienfelder gleichartig gekrümmt sind, so weisen sie doch Unterschiede in den Gradienten auf. Um eine Orientierung für die Dimensionierung geben zu können, wird die nachfolgende Betrachtung angestellt. Soll die Ansprechzeit bei der oben dargestellten Netzsituation 1,5 ms nicht überschreiten, so ist bei einem spezifischem Compoundwiderstand von $0,4\text{ Ωcm}$ eine Compoundgröße von 25 cm^2 gerade noch zulässig. Bei einem spezifischen Compoundwiderstand von $1,9\text{ Ωcm}$ sind hingegen bis 45 cm^2 statthaft. Im Nennbetrieb beträgt die Stromtragfähigkeit der zu erst genannten Konfiguration 33 A und die der zweiten 23,7 A. Es ist somit günstiger als Compound ein kleineres dafür aber besser leitfähiges Plättchen einzusetzen als ein größeres mit einer geringeren Leitfähigkeit, zumal bei der zweitgenannten Konfiguration trotz niedrigeren Nennstroms eine höhere Verlustleistung (8 W gegenüber 5,9 W) auftritt. Diese ergibt sich aus dem - in Folge der größeren Compoundfläche notwendigem - größeren Gehäuse.

7.2 Schaltungsvarianten

Wie im Abschnitt 1 dargestellt, hat ein strombegrenzender Schalter neben der raschen Erkennung einer Kurzschlusssituation und der Einleitung von Maßnahmen zur Strombegrenzung auch die Aufgabe den fehlerhaften Stromkreisteil vom restlichen Netz galvanisch zu trennen. Diese Funktion wird von einem polymeren Strombegrenzer in Form eines kraftkontaktierten Polymercompounds nicht realisiert. Es gibt Gedankenansätze (z.B. [45]) das Abheben der Elektroden als Auslöser zum Öffnen eines Schaltstücks zu verwenden. Da jedoch für das Auftreten des Oberflächeneffekts eine bestimmte Mindestleistung erforderlich ist, wäre für eine praktische Realisierung mindestens noch ein zweiter Auslöser für den Bereich Überlast - kleinere Kurzschlussströme erforderlich. Somit wird bei der heute bekannten praktischen Realisierung [44] auf die Reihenschaltung von polymerem Strombegrenzer und Leitungsschutzschalter zurückgegriffen (Abb. 80).

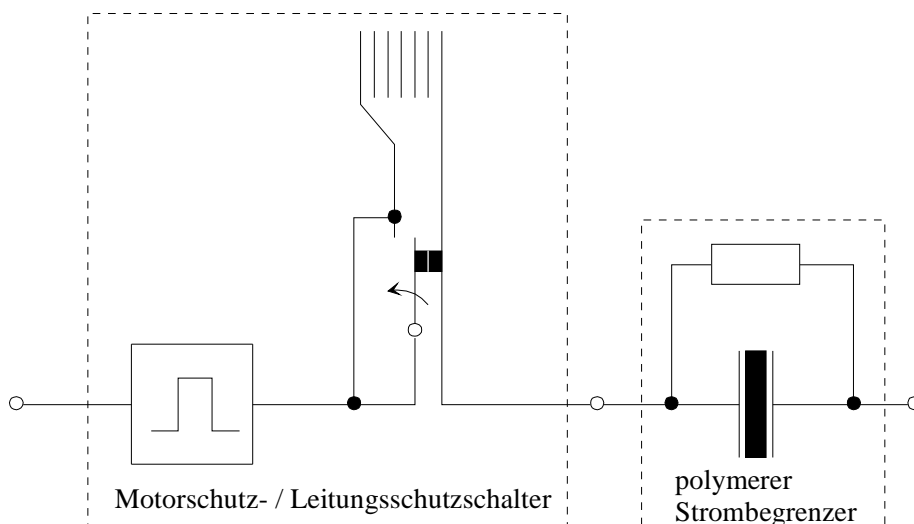


Abb. 80: Reihenschaltung Schutzschalter + polymerer Strombegrenzer

Der polymere Strombegrenzer hat bei dieser Schaltungsvariante die Aufgabe die Schaltleistung des verwendeten Schutzschalters zu vergrößern. Inaktiv bleibt er im Nennbetrieb, Überlast und bei kleineren Kurzschlussströmen. Bei höheren Kurzschlussströmen greift dieser dann - den Schutzschalter unterstützend - in den Strombegrenzungsprozess ein. In den Abbildungen 81 und 82 ist eine Versuchsausschaltung eines polymeren Strombegrenzers in Reihe mit einem Motorschutzschalter im Vergleich zu einer Ausschaltung Motorschutzschalter mit ohmschen Konstantwiderstand in Reihe dargestellt. Durchgeführt wurde der Versuch im Prüflaboratorium der Moeller GmbH Bonn.

Bei der Referenzschaltung wurde für den Konstantwiderstand entsprechend des Kaltwiderstands des polymeren Strombegrenzers ein Wert von 13 mΩ gewählt.

Parameter: Stöße 4408, 4410

- Compound: HDPE + 40 Mas% Ruß;
Dicke: 1,3 mm
- Elektrodengröße: 21 cm²; F_K = 5 kN
- I_{PROS_EFF} = 100 kA; ϕ_E = 60°; U = 254 V
- R₀ = 13 mΩ, R_{BP} = 0,2 Ω

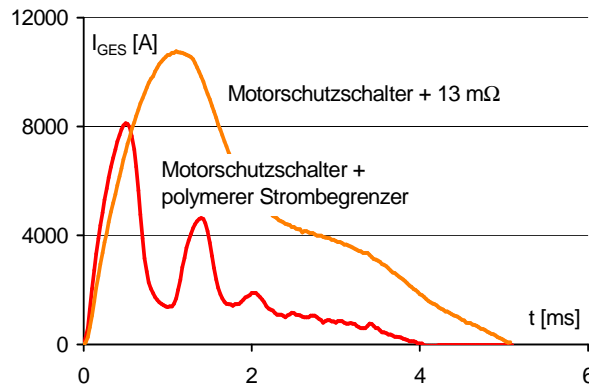


Abb. 81: Stromvergleich

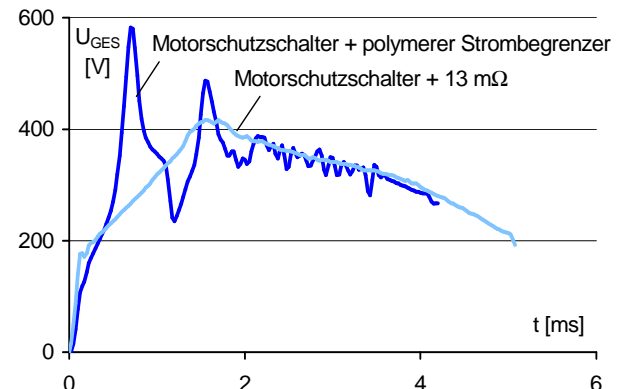


Abb. 82: Spannungsvergleich

Der - durch das Ansprechen des polymeren Strombegrenzers bedingte - bedeutend schnellere Anstieg der Gegenspannung ab 0,5 ms Versuchsdauer (Abb. 82) ist die Ursache dafür, dass bei der Kombination Motorschutzschalter + polymerer Strombegrenzer eine bedeutend bessere Strombegrenzung (Abb. 81) erzielt wird. So beträgt die Stromkreisbelastung hier nur 35.000 A²s gegenüber 160.000 A²s bei der Reihenschaltung Motorschutzschalter + 13 mΩ Konstantwiderstand.

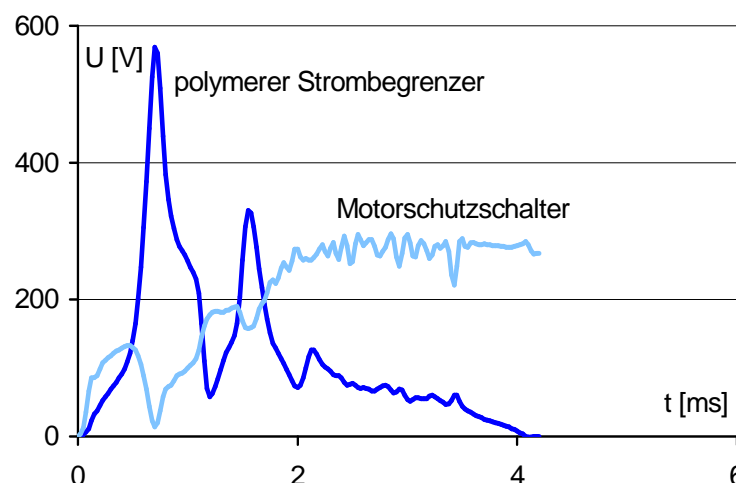
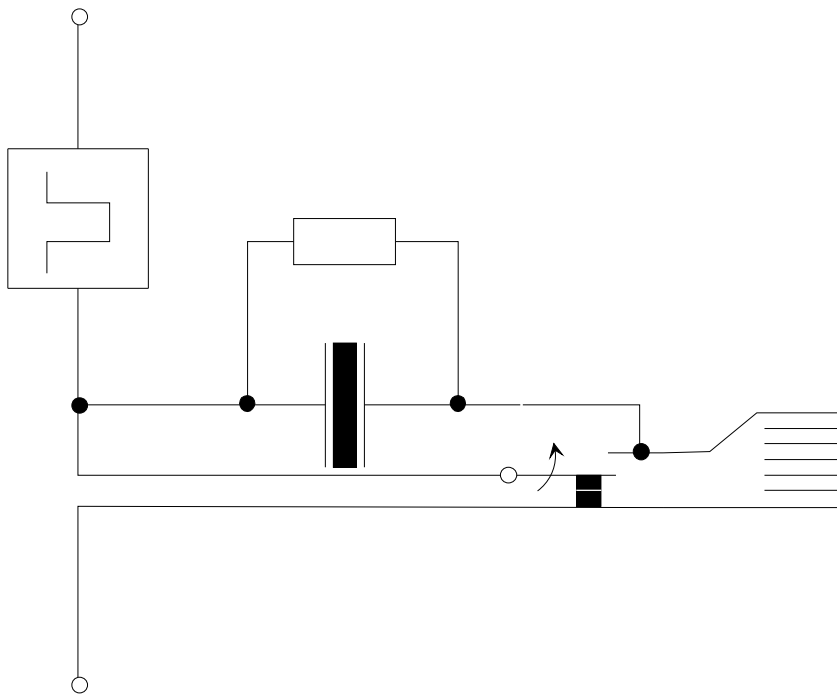


Abb. 83: Einzelspannungen der Schaltung polymerer Strombegrenzer + Motorschutzschalter

Abb. 83 zeigt die Einzelspannungen bei der Zusammenschaltung Motorschutzschalter + polymerer Strombegrenzer. Wegen des raschen Stromanstiegs kommt es in Folge der Repulsionskräfte zum Öffnen der Kontakte des Motorschutzschalters, ohne dass der magnetische Auslöser in Aktion getreten ist. Bedingt durch das Ansprechen des polymeren

Strombegrenzers, erfolgt eine drastische Reduktion des Stroms. Die Folge ist, dass die Kontakte des Motorschutzschalters wieder schließen und unter Umständen verschweißen können. Bei dem oben dargestellten Schaltversuch wurde allerdings kein Verschweißen beobachtet. Der

Die einander entgegenstehenden Dimensionierungskriterien für Nennbetrieb und Kurzschluss sowie die unter Umständen erhöhte Schweißneigung stellt die Reihenschaltung von polymeren Strombegrenzer und Motorschutzschalter bzw. Leitungsschutzschalter zur Schaltleistungserhöhung in Frage. Besser in diesem Zusammenhang wäre eine Schaltungsvariante bei der sich der polymere Strombegrenzer nur im Kurzschlussfall im Stromkreis befindet (Abb. 84), nachdem der Motorschutzschalter seine Kontakte geöffnet hat.



Bei dieser Schaltungsvariante würde der polymere Strombegrenzer erst in den Strompfad eingeschaltet, nachdem der Motorschutzschalter seine Kontakte geöffnet hat und der Lichtbogen von den Kontaktstücken auf die Laufschiene, die zur Löschkammer führen, kommutiert ist. Dies trägt zur Verringerung der Schweißwahrscheinlichkeit bei. Nachteilig bei dieser Variante ist, dass der polymere Strombegrenzer erst in das Geschehen eingreifen kann, nachdem der Motorschutzschalter seine Kontakte geöffnet hat. Verglichen mit der Reihenschaltung Motorschutzschalter + polymerer Strombegrenzer ergibt sich damit eine schlechtere Strombegrenzung. Ein enormer Vorteil ist hingegen, dass sich der polymere Strombegrenzer im Nennbetrieb nicht im Strompfad befindet. Somit kann dieser - ohne dass auf den Nennbetrieb Rücksicht genommen werden muss - für den Kurzschlussfall dimensioniert werden. Die Größe des Compounds und auch der Compoundwiderstand sind zweitrangig. Dem eigentlichen Sinn der

Verwendung des polymeren Strombegrenzers - die Schaltleistungsertüchtigung insbesondere für höhere Spannungsebenen - würde man trotzdem gerecht werden können.

Ein weiterer bisher nicht angesprochener Aspekt lässt sich mit dieser Schaltungsvariante positiv beeinflussen. Im Gegensatz zur Reihenschaltung verfügt hier der polymere Strombegrenzer nicht durch eine vorhergehende, unbestimmte Belastung im Nennbetrieb über einen unbekannten Erwärmungszustand. Die bis zum Ansprechen benötigte Energiemenge ist somit reproduzierbar.

7.3 Grenzleistung, Überspannungen

Das Ende der Lebensdauer eines polymeren Strombegrenzers ist erreicht, wenn die gesamte Compoundmasse aufgebraucht ist. Darüber hinaus wird ein vorzeitiges Lebensdauerende verzeichnet, wenn die über dem polymeren Strombegrenzer umgesetzte Leistung einen Grenzwert überschreitet. Da der Volumenstrom an Zersetzungsgas und der von diesem Gasstrom erzeugte Druck mit der Leistung zunimmt, kommt es ab einem Grenzwert zum Überschreiten der mechanischen Festigkeit und damit zum Bruch des Compounds. Es wird ein explosionsartiges Herausdrücken der Bruchstücke zwischen den Elektroden beobachtet. In Folge der auf die Metallelektroden wirkenden Kontaktkraft werden diese aufeinander gedrückt. Dies führt zu einem Kurzschluss und dem Auftreten eines Lichtbogens zwischen den Elektroden (vergleiche hierzu auch Abschnitt 6.7.2).

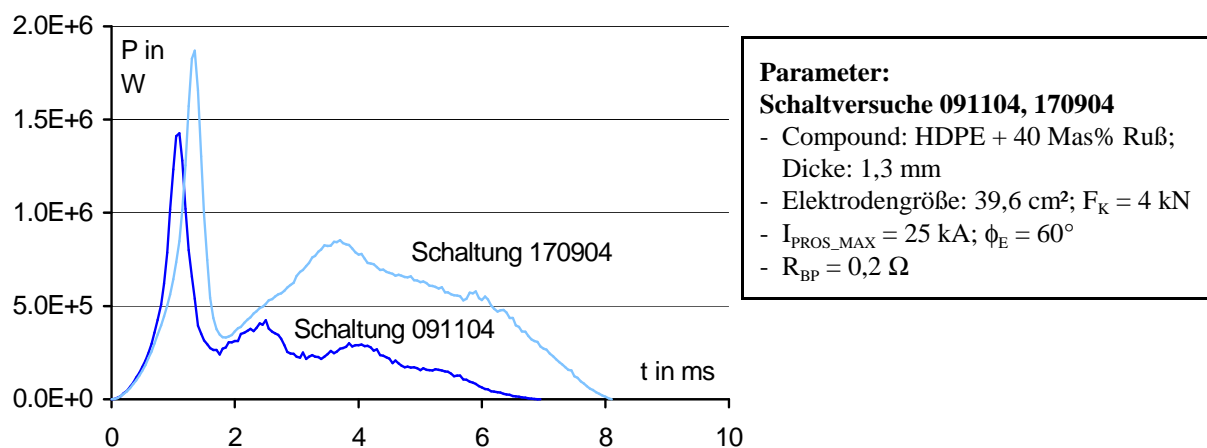


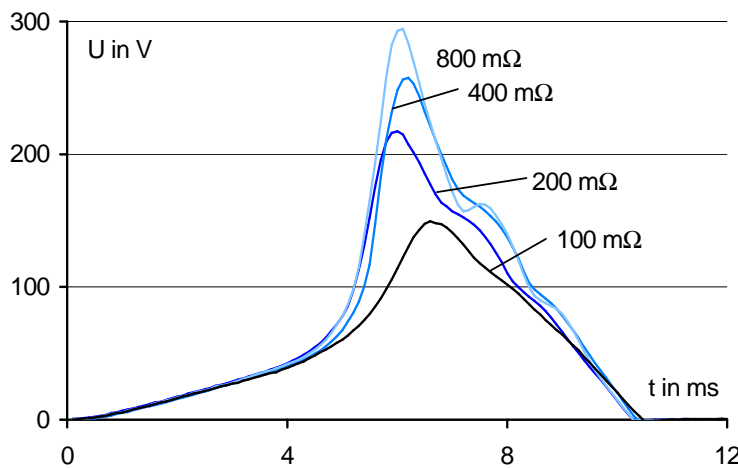
Abb. 85: Leistungsmeßschriebe der Schaltversuche 091104 und 170904

Bei der in dieser Arbeit üblicherweise verwendeten Konfiguration liegt die Grenzleistung zwischen 1,5 MW und 1,8 MW. So wurde bei dem Schaltversuch 170904 ein Bruch des Probekörpers verzeichnet, während das Compound bei dem Schaltversuch 091104 unversehrt blieb.

Wie der Leistungsmeßschrieb (Abb. 85) des fehlerfreien Schaltversuchs 091104 zeigt, handelt es

sich bei dem beobachteten Leistungsmaximum um einen schmalen Bereich während des ersten Ansprechens des polymeren Strombegrenzers. Der Durchschnittswert der Leistung liegt weit unterhalb dieser Spitze. Bei dem Schaltversuch 091104 beträgt der Spitzenwert der Leistung 1,43 MW während der Mittelwert bei nur 0,26 MW liegt. Somit wird das Schaltvermögen eines polymeren Strombegrenzers durch die Höhe dieser schmalen Leistungsspitze bestimmt. Um diese zu verringern und damit das Schaltvermögen zu verbessern, kann dem polymeren Strombegrenzer ein Bypasswiderstand parallel geschaltet werden. Aus den Messschrieben ist ersichtlich, dass mit einer Verringerung des Bypasswiderstands

- eine Verringerung der über dem Compound umgesetzten Spitzenleistung (Abb. 87),
- eine Verringerung der über dem polymeren Strombegrenzer messbaren Spannung (Abb. 86) sowie
- eine Erhöhung des Wärmedurchlasswerts verbunden ist.



**Parameter: Schaltversuche
90708, 90711, 90714, 90716**

- Compound: HDPE + 40 Mas% Ruß;
Dicke: 1,6 mm
- Elektrodenfläche: 42 cm²; $F_K = 4 \text{ kN}$
- $I_{\text{PROS_MAX}} = 6 \text{ kA}$; $\phi_E = 0^\circ$
- 90708: $R_{\text{BP}} = 0,1 \Omega$
- 90711: $R_{\text{BP}} = 0,2 \Omega$
- 90714: $R_{\text{BP}} = 0,4 \Omega$
- 90716: $R_{\text{BP}} = 0,8 \Omega$

Abb. 86: Abhängigkeit des $U(t)$ -Verlaufs eines polymeren Strombegrenzers von der Größe des Bypasswiderstands

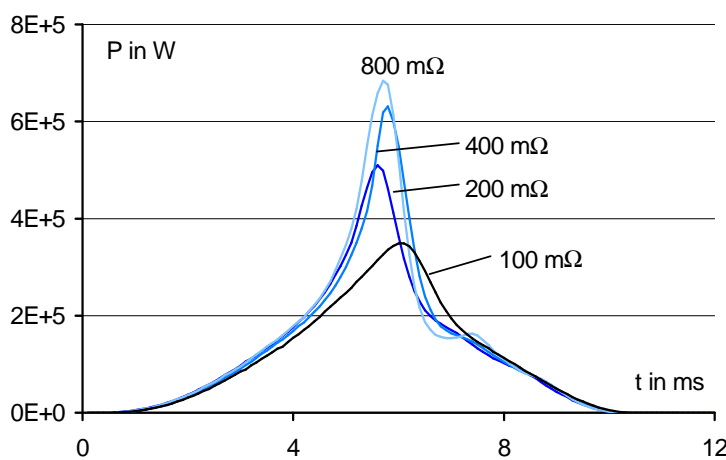


Abb. 87: Abhängigkeit der über dem Polymercompound umgesetzten Leistung von der Größe des Bypasswiderstands

Strombegrenzung und Schaltüberspannung zu finden.

Die Verwendung eines Bypasswiderstands hat somit neben der Möglichkeit der Erhöhung der Schaltleistung auch eine Verschlechterung des Strombegrenzungsverhalten zur Folge. Es ergibt sich damit auch im Fall des Bypasswiderstands die Notwendigkeit, eine auf den Anwendungsfall hin dimensionierte Lösung für den Zusammenhang zwischen zulässiger Compoundleistung,

Eine Möglichkeit den Zusammenhang zwischen der Verringerung der über dem Compound umgesetzten Spitzenleistung sowie der Verschlechterung der Strombegrenzung zu entkoppeln, würde die Verwendung eines Varistors als Bypasswiderstand darstellen. Der Bypasszweig greift hier nur beim ersten Ansprechen und der damit verbundenen Leistungsspitze aktiv ein. Somit könnte die das Compound schädigende Leistungsspitze gekappt werden, ohne dass das weitere Verhalten beeinflusst wird. Es wird vermieden, dass außerhalb der Leistungsspitze Strom über dem Bypasspfad fließt und somit zur Verschlechterung der Strombegrenzung beiträgt. Ursächlich für das Kappen der Leistungsspitze bei Verwendung eines Varistors ist die Begrenzung der über dem polymeren Strombegrenzer messbaren Spannung. Durch diese Maßnahme ist es somit ebenfalls möglich die Schaltüberspannung in einem definierten Rahmen zu halten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das heute am häufigsten eingesetzte Wirkprinzip zur Strombegrenzung beruht auf dem Spannungsaufbau mittels Lichtbogen. Im Bereich Leitungsschutz- bzw. Motorschutzschalter verwendet man bedingt durch die kompakte Bauform Löschblechpakete um die Lichtbogen- spannung in die gewünschte Größenordnung von $1,5 \dots 2,5 \cdot U_{\text{NETZ}}$ zu bekommen. Der Erhöhung der Lichtbogenspannung auf diese Weise sind jedoch Grenzen gesetzt. Die Verwendung polymerer Strombegrenzer kann so zur Schaltleistungserhöhung sowie zur Verbesserung der Strombegrenzung dieser Schaltgeräte beitragen.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zum Verständnis der Wirkungsweise von Strombegrenzern auf der Basis von Polymercompounds und will Ansatzpunkte für die Konstruktion leistungsfähigerer, kompakter strombegrenzender Schalter liefern.

Der Ladungstransport durch das Compound erfolgt mittels Elektronenleitung entlang der Rußteilchen des Perkulationsnetzwerks. Ein direkter Kontakt der Rußteilchen ist dabei nicht notwendig (Abstand $< 10 \text{ nm}$). Für das Zustandekommen des Perkulationsnetzwerks (Perkulationsschwelle) ist eine Mindestkonzentration an Füllstoffteilchen in der Matrix erforderlich. Diese hängt in erster Linie von der Art der Verteilung ab. Während bei stochastischer Verteilung ungefähr 25 Vol% Füllstoff notwendig ist, ergibt sich bei der Selbstagglomeration eine Perkulationsschwelle von ca. 0,4 Vol%.

Der Temperaturkoeffizient des Compoundwiderstands ist im Durchgangs- und Sprungbereich größer als Null (PTC-Effekt). Die Ursache für dieses Verhalten liegt bei dem größeren Ausdehnungskoeffizienten des Matrixmaterials gegenüber dem Füllstoff. Dies führt bei

Temperaturerhöhung zu einer Verringerung der Anzahl der Berührungsstellen zwischen den Füllstoffteilchen bzw. zu einer Vergrößerung des Teilchenabstands. Im Sperrbereich ist der Ausdehnungskoeffizient des Matrixmaterials etwa doppelt so groß wie im Durchgangsbereich. Dennoch wird hier ein negativer Temperaturkoeffizient beobachtet (NTC-Effekt). Ursächlich für dieses Verhalten ist die Neigung der Füllstoffteilchen zur Selbstagglomeration, welche nach dem Aufschmelzen des Compounds und der damit verbundenen starken Viskositätsverringering einsetzt.

Während theoretische Untersuchungen zur Bestimmung der Perkolationsschwelle vorliegen, könnte es Gegenstand weiterführender Arbeiten sein, den Zusammenhang zwischen der Verringerung der Compoundviskosität beim Aufschmelzen, der Füllstoffteilchenagglomeration und der damit verbundenen Erhöhung der Leitfähigkeit zu untersuchen.

Das Eigenschaftsprofil eines Compoundwerkstoffs wird durch eine Vielzahl von Parametern geprägt. Es kann nach das Matrixmaterial, den Füllstoff sowie das Verarbeitungsverfahren betreffenden Parametern unterschieden werden. Zur Compoundoptimierung für die Strombegrenzung wurde eine Zielfunktion formuliert. Durch das Abgleichen der Auswirkungen der betrachteten Parameter auf die Zielfunktion erfolgte die Auswahl von Matrixmaterial, Füllstoff sowie Herstellungsverfahren.

Die Analyse nicht nachvollziehbarer Ergebnisse bei der quasistatischen Vermessung der Compounds im Wärmeofen führten zu der Erkenntnis, dass das Verhalten eines polymeren Strombegrenzers nicht nur vom Verhalten des Compounds selbst gekennzeichnet ist, sondern auch wesentlich durch das Verhalten an der Grenzschicht zwischen Compound und Elektrode bestimmt wird. Die Untersuchung dieses durch Oberflächenrauheiten gekennzeichneten Gebiets ergab, dass die mikroskopischen Kontaktrauheiten keinen nennenswerten Einfluss auf die Qualität der Kontaktierung ausüben, jedoch die makroskopischen Rauheiten einen solchen besitzen. Um den sich hieraus ergebenden Konsequenzen, den Besonderheiten im Fall eines Metall-Compound-Kontakts sowie den zu erwartenden Beanspruchungen im Fall einer Hochstrombelastung genügen zu können, wurde ein spezieller Metall-Compound-Kontakt abgeleitet. Zur Darstellung der prinzipiellen Besonderheiten eines Metall-Compound-Kontakts, wurde ein maßstabsgetreues Modell geschaffen. Auf der Grundlage dieses Modells erfolgte die Ableitung der Funktionsweise eines polymeren Strombegrenzers bei Hochstrombelastung.

Wie gezeigt werden konnte, bietet der Gütefaktor eine einfache aber dennoch aussagekräftige

Größe zur Beurteilung des Anteils der wahren Berührungsfläche an der geometrischen Kontaktfläche und damit der Qualität einer Kontaktierung. Aufbauend auf das abgeleitete maßstäbliche mikroskopische Kontaktmodell und den vorhandenen Oberflächentopologien könnten an dieser Stelle Arbeiten anknüpfen, die sich mit der quantitativen Ermittlung der wahren Berührungsfläche beschäftigen. Dies würde die Voraussetzung schaffen, die im Compound ablaufenden Prozesse zu unterlegen. Vordergründig wären hierbei die Stromkommutierungsvorgänge im Volumen sowie die Entstehung der Seen geschmolzenen bis zur Zersetzungstemperatur erwärmten Compounds an der Oberfläche von Interesse.

Durch eine Reihe von Hochstromversuchen konnte gezeigt werden, dass sich das Verhalten eines polymeren Strombegrenzers nicht durch eine einfache Betrachtung mit Hilfe des PTC- oder des Oberflächeneffekts beschreiben lässt. Vielmehr werden eine Abfolge mehrerer Effekte bzw. Modifikationen eines Effekts beobachtet. Welche Effekte auftreten bzw. welche Wertigkeit diese untereinander besitzen, ist vordergründig eine Frage des prospektiven Stroms. Zur Unterscheidung der Auswirkungen der einzelnen Effekte wurden zwei Vorgehensweisen aufgestellt:

1. Auswertung der Minimums im $R(t)$ -Messschrieb und
2. Auswertung der Änderungen der Widerstandsanstiege im $R(t)$ -Messschrieb.

Während mit dem zweiten Verfahren eine detailliertere Betrachtung des Gesamtverhaltens möglich ist, dieses jedoch nur bei größeren Ansprechzeiten und der Verwendung von Gleichstrom angewendet werden kann, ist das erste für schnellere Vorgänge sowie für Wechselstrom geeignet. Insgesamt kann zwischen 5 verschiedenen Vorgängen unterschieden werden. Dem Compound sind der oberflächennahe PTC-Effekt, der Volumen-PTC-Effekt, der Volumen-PTC-Effekt nach erfolgter Stromkommutierung und der NTC-Effekt zuzuordnen. Der Grenzschicht zwischen Elektrode und Compound hingegen ist der Oberflächeneffekt zuordenbar.

Das Auftreten des Volumen-PTC-Effekts ist auf die Compoundbereiche beschränkt, die sich direkt zwischen Zonen höherer Berührungsstellendichte befinden. Nachdem diese hochohmig geworden sind, erfolgt eine Kommutierung des Stroms auf die angrenzenden Bereiche. Ist dort ebenfalls der Übergang in den hochohmigen Zustand vollzogen, erfolgt eine weitere Kommutierung usw. Dies ist die Ursache, warum der Widerstandsanstieg im Bereich „Volumen-PTC-Effekt nach erfolgter Stromkommutierung“ weniger steil als im Bereich „Volumen-PTC-Effekt“ ausfällt. Da die hochohmig geworden Compoundbereiche nicht stromlos sind, werden sich diese weiter erwärmen. Auf Grund des damit verbundenen NTC-Effekts erfolgt ein

zurückkommutieren des Stroms in die als erstes hochohmig gewordenen Bereiche. Dies bedingt, dass der im dynamischen Betriebsfall in Folge des PTC-Effekts erreichte Maximalwert des Widerstands viel geringer ausfällt als bei einer quasistatischen Ermittlung der $R(T)$ -Kennlinie im Wärmeofen.

Wegen der schlechteren Leitfähigkeit sowie des kleineren stromtragenden Querschnitts in der oberflächennahen Schicht kommt es in diesem Bereich bei Hochstrombelastung zu einer stärkeren Erwärmung und somit zu einem früheren Ansprechen als im Volumen.

Der Oberflächeneffekt hat seine Ursache im Abheben der Elektroden vom Compound. Verantwortlich für das Abheben ist die Zersetzung des Compounds an der Oberfläche. Mittels einer dynamischen Kraftmessung konnte der Zusammenhang zwischen der Änderung der Kontaktkraft, der Abhebehöhe der Elektroden vom Compound und dem Widerstand des polymeren Strombegrenzers gezeigt werden. Wegen der nicht vollständig geklärten Ursache der Phasenverschiebung zwischen Kraft und Widerstand, wäre in weiterführenden Untersuchungen das direkte Messen der Elektrodenabhebung sinnvoll.

Für das Abheben der Elektroden ist ein bestimmter Mindestvolumenstrom an Zersetzungsgas notwendig. Da die Zersetzungsgasentstehung mit der in der Grenzschicht umgesetzten Leistung zusammenhängt, ist zum Abheben der Elektroden und damit zum Auftreten des Oberflächeneffekts eine bestimmte Mindestleistung erforderlich. Wird die zum Auftreten des Oberflächeneffekts benötigte Mindestleistung nicht erreicht, kann dennoch Compoundabbrand auftreten.

Der oberflächennahe PTC-Effekt ist die Voraussetzung für den Oberflächeneffekt. Der Volumen-PTC-Effekt hingegen steht nicht im Zusammenhang mit dem Oberflächeneffekt. Somit kann auch nicht pauschal beantwortet werden, ob der Oberflächeneffekt vor dem Volumen-PTC-Effekt auftritt oder umgekehrt. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass bei kleineren prospektiven Strömen der Volumen-PTC-Effekt vor dem Oberflächeneffekt einsetzt, während bei größeren Strömen das umgekehrte Verhalten zu beobachten ist. Mit steigender prospektiver Stromstärke gewinnt der Oberflächeneffekt an Dominanz über das Gesamtverhalten.

Der klassischen Kontakttheorie zur Folge ist bei der Trennung zweier Kontaktstücke mit der Explosion der letzten Kontaktbrücke zwangsläufig die Entstehung eines Lichtbogens verbunden. Es wurden jedoch eine Reihe von Beobachtungen gemacht, die gegen die Existenz eines Lichtbogens sprechen. Dies führte zur Aufstellung einer Hypothese nach der ein Gemisch aus Ruß und Zersetzungsgas - analog einem Gemisch aus Ruß und PE - als Zweikomponentensystem angesehen werden kann, auf welches die Perkolationstheorie anwendbar ist. So ist bei

entsprechender Rußkonzentration ein Ladungsübergang zwischen abgehobener Elektrode und Compound über die sich im Zwischenraum befindlichen Rußteilchen möglich, ohne dass ein Lichtbogen entsteht.

Erfolgt zur Schaltleistungserhöhung eines Motorschutzschalters die Reihenschaltung mit einem polymeren Strombegrenzer sind Nennstromtragfähigkeit und Strombegrenzungsverhalten die Eckpunkte bei der Dimensionierung des Compounds. Ungünstig wirken sich hierbei die entgegengesetzten Dimensionierungskriterien aus. So besitzt ein polymerer Strombegrenzer mit einer guten Nennstromtragfähigkeit ein schlechtes Strombegrenzungsverhalten und umgekehrt. Mit der Kombination niedriger spezifischer Widerstand und kleine Compoundabmessungen lässt sich ein besserer Kompromiss schließen als mit der Kombination höherer spezifischer Widerstand und größere Abmessungen.

Unter Verwendung eines polymeren Strombegrenzers kann das Schaltvermögen eines Motorschutzschalters von 30 kA auf 100 kA gesteigert werden. Der Wärmedurchlasswert wurde dabei auf weniger als ein viertel gesenkt.

Die einander entgegenstehenden Dimensionierungskriterien für Nennbetrieb und Kurzschlussfall stellen die Reihenschaltung in Frage. Weiterführende Arbeiten könnten sich deswegen mit der Einschaltung des polymeren Strombegrenzers z.B. in den Löschblechkreis beschäftigen.

Da der Volumenstrom an Zersetzungsgas mit der umgesetzten Leistung zunimmt, existiert eine Grenzleistung ab der es zum Bruch des Compoundplättchens und somit zur Zerstörung des polymeren Strombegrenzers kommt. Es konnte gezeigt werden, dass durch einen Bypasszweig die maximal im polymeren Strombegrenzer umgesetzte Leistung verringert und somit das Schaltvermögen gesteigert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Erk, M. Schmelzle: „Grundlagen der Schaltgerätetechnik“, S. 116f & S.129ff; 1974, ISBN 3-540-06075-8
- [2] G. Burkhard: „Schaltgeräte der Elektroenergietechnik“; 1985
- [3] H. Saechtling: „Kunststoff Taschenbuch“; ISBN 3-446-15385-3
- [4] H.-J. Radusch, M. Stolp, A.K. Bledzki: „Polyamid-ABS-Blends unter dem Mikroskop“; Kunststoffe 1993 S.557ff
- [5] D.W. Lee: „Formteile durch Vernetzen mit ionisierenden Strahlen veredeln“; Kunststoffe 1993 S.127ff
- [6] R. Schandy: „Oxidationsvorgänge bei der Strahlenvernetzung von HDPE“; Kunststoffe 1978 S. 167ff
- [7] M. Narkis, A. Ram, Z. Stein: „Effect of crosslinking on carbon black / polyethylen switching materials“; Journal of Applied polymer Science 1980 S. 1515ff
- [8] K.-H. Möbius: „Füllstoffhaltige elektrisch leitfähige Kunststoffe“; Kunststoffe 1988 S. 53ff
- [9] Firmenschrift BASF: „Lupolen PE-HD; PE-MD“
- [10] A. Kaiser: „Kontaktwiderstandsmessung an ausgehärteten Polymerschichten“; Diplomarbeit TU Chemnitz 1991
- [11] Firmenschrift Degussa, Schriftenreihe Pigmente: „Pigmentruße für Kunststoffe“; Nr. 40
- [12] R. Gilg: „Ruß für leitfähige Kunststoffe“; Kunststoffberater 1977 S. 262ff & S. 312ff
- [13] O. Jeppsson, M. Bijlenga, L. Banghammar: „High Power Current Limiting Devices with Low-resistance Layer“; Proceedings of 20th ICEC 2000 ISBN 91-7170-585-6
- [14] H. Löbel: „Zur Dauerstrombelastbarkeit und Lebensdauer der Geräte der Elektroenergieübertragung“; Diss. B TU Dresden 1984
- [15] H. Böhme: „Mittelspannungstechnik“ S. 106; ISBN 3-341-00973-6
- [16] C. Brazzola: „Current limitation by circuit-breaker and polymer combination“; 6. International Conferenc of Elektric Fuses anf their Application 1999 S. 307 ff
- [17] W. Schatt: „Einführung in die Werkstoffwissenschaft“ S. 72ff & S. 132; ISBN 3-342-00190-9
- [18] A.R. Duggal, F.G. Sun, L.M. Levinson: „High power current limiting with conductor-filled polymer comosites“; 44 IEEE-Holm Conference on electrical contacts, 1998, S. 75ff
- [19] H.J. Mair: „Kunststoff-Formmassen mit elektrischer Leitfähigkeit“; Kunststoffe 1983 S. 516ff
- [20] R.S. Perkins, A. Rüegg, M. Fischer, P. Streit, A. Menth: „A New PTC Resistor for Power

- Applications“; IEEE Transactions on Components, hybrids and manufacturing technology 1982 S. 225ff
- [21] M. Narkis, A. Ram, F. Flashner: „Electrical Properties of Carbon Black Filled Polyethylene“; Polymer Engineering and Science 1978 S. 649 ff
 - [22] M. Lindmayer: „Strombegrenzung in Niederspannungsnetzen“; VDE-Fachbericht: „Kontaktverhalten und Schalten“; VDE-Fachbericht: „Kontaktverhalten und Schalten“, 13. Kontaktseminar 1995, S.147 ff
 - [23] T. Itami, R. Xu, W. van der Lugt: „The resistivities of liquid K-Ga alloys“; Journal of Alloys and Compounds 1993 S.37ff
 - [24] D. Kehr: „Berechnung von elektrischen Begleitheizungen für Rohre und Behälter“; etz 1994 S.192ff
 - [25] W. Dittrich: „On the Electrical Behaviour of the Polar Liquid Propylene Carbonate: A Pseudo Ohmic Current-Voltage Relation“; ETEP 1994 S. 139 ff
 - [26] P.O. Karlström: „An overload protective system“; Patentschrift: WO 93/21677
 - [27] H. Böhme, H. Löbel: „Zur Theorie des Langzeitverhaltens von Aluminium-Schraubverbindungen“; elektris 1987 S. 179 ff
 - [28] R. Schüler: „Entwicklung polymerer Verbundwerkstoffe mit elektrischer Leitfähigkeit“; Diss 1994 TU Hamburg-Harburg
 - [29] Z. Xing: „Verarbeitung, Struktur und Eigenschaften von hochgefüllten teilkristallinen Thermoplasten“, S.5f; ISBN 3-7983-1675-9
 - [30] W. Michaeli, J. Knothe, O. Pfannschmidt, S. Seibt: „Modifikation von Bauteil- und Verarbeitungseigenschaften von Kunststoffen durch feste und gasförmige Zuschlagstoffe“; GAK 1996 S. 568ff
 - [31] D.W. van Krevelen: „Properties of Polymers“; 1990
 - [32] F.A. Doljack: „Polyswitch PTC Devices - A New Low-Resistance Conductive Polymer-Based PTC Device for Overcurrent Protection“; IEEE Transactions on components, hybrids and manufacturing technology 1981 S. 372ff
 - [33] B. Jachym, H. Sodolski, T. Slupkowski, R. Zielinski: „Metallic Conductivity of Polyester Resin - Acetylene Carbon Black Compounds“; Physica Status Solidi (a) 1974 K159ff
 - [34] H.J. Mair: „Elektrisch leitende Kunststoffe“; ISBN 3-446-14608-3
 - [35] G.H. Kleinheins: „Strahlungsvernetzte leitfähige Kunststoffe und ihre Anwendung“; Kunststoffe 1984 S. 737 ff
 - [36] H. Sodolski, R. Zielinski, T. Slupkowski, B. Jachym: „The Current-Voltage Characteristics

of Polyester Polymer-Carbon Black Compositions“; Physika Status Solidi (a) 1975 S. 603 ff

- [37] A. Wabner, D. Amft, F. Richarz, T. Hindert: „Contacting highly filled polymers“, S. 391ff; Proceedings of 19th ICEC `98 ISBN 3-8007-2382-4
- [38] G. Menges: „Werkstoffkunde Kunststoffe“, S. 43 & S.108; ISBN 3-446-15612-7
- [39] F. Lux; Journal of Material Science 1993 S. 285
- [40] A. Heger: „Technologie der Strahlenchemie von Polymeren“; ISBN 3-446-15630-5
- [41] R. Holm: „Electric Contacts“; Springer 1967
- [42] F. Richarz, F. Berger, A. Krätzschmar, D. Amft, A. Wabner: „Widerstandsverhalten metallkontaktierter Kunststoff-Compounds“, S. 185 ff; VDE-Fachbericht 51; 1997
- [43] T. Hansson, P.O. Karlström: „PTC-Element“; Patentschrift EP 0487920A1
- [44] T. Hansson: „Polyäthylen-Stromwächter für den Kurzschlußschutz“; ABB Technik 4/92
- [45] D.W. Brandston: „Schalter zur Strombegrenzung“; Patentschrift DE 44 46 045 A1
- [46] A. Breining: „Ätzen von Kunststoffen“ S. 4.0ff ; Fachseminar: „Präparationstechniken und Lichtmikroskopie an Polymerwerkstoffen“, 1996, Lehrstuhl für Kunststofftechnik Universität Erlangen-Nürnberg
- [47] S. Nakamura, T. Tomimura: „Temperature dependence of resistivity of carbon black-polyethylene composites below and above the percolation threshold“; 18th International Conference: Dielectric Materials, Measurements and Applications, Edinburgh 2000; Conference Publication No. 473 S. 265 ff
- [48] DIN VDE 0641 Teil 11 Anhang H: „Anordnung für die Erfassung des Ausstoßes ionisierter Gase bei Schaltvermögensprüfungen“
- [49] G. Widmann, R. Riesen: „Thermoanalyse“, S. 60; ISBN 3-7785-1962-X
- [50] L. Gmelin: „Handbuch der anorganischen Chemie“
- [51] F. Ullmann: „Encycloedia of industrial chemistry“

Anhang 1: Kristallisationsbegünstigende Struktureinflüsse der Kunststoffe

In Anlehnung an [17] sind die folgenden Eigenschaften wesentlich für das Kristallisationsverhalten der Kunststoffe.

1. Molekülgestalt:

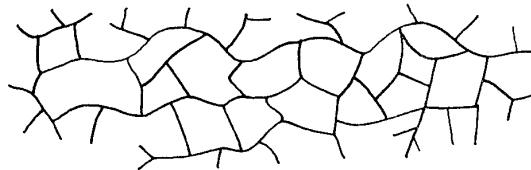
- lineare Form:



- verzweigte Form:

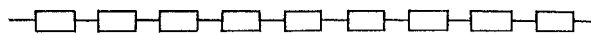


- vernetzte Form:



2. der chemische Aufbau der Moleküle

- regelmäßiger Aufbau:

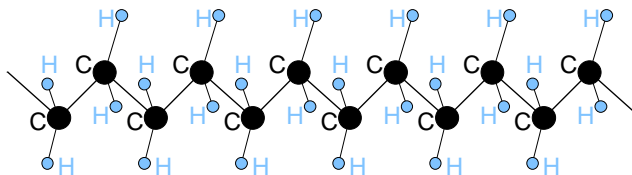


- unregelmäßiger Aufbau:

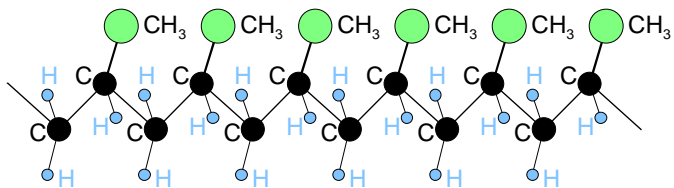


3. funktionelle Seitengruppen

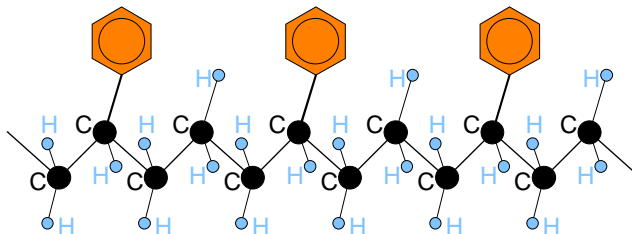
- keine Seiten-
gruppen (PE):



- kleine Seiten-
gruppen (PP):



- größere Seiten-
gruppen (PS):



Kristallisationsbegünstigend wirken dabei:

- lineare bzw. wenig verzweigte Moleküle
- ein regelmäßiger chemischer Aufbau der Moleküle und
- kleine oder fehlende funktionelle Seitengruppen

Anhang 2: Versuchsapparatur zur Bestimmung von $R(T)$

Die Abhängigkeit des Compoundwiderstands von der Temperatur wird quasistatisch mittels Fremderwärmung in der folgenden Anordnung bestimmt (Abb. 88 & 89).

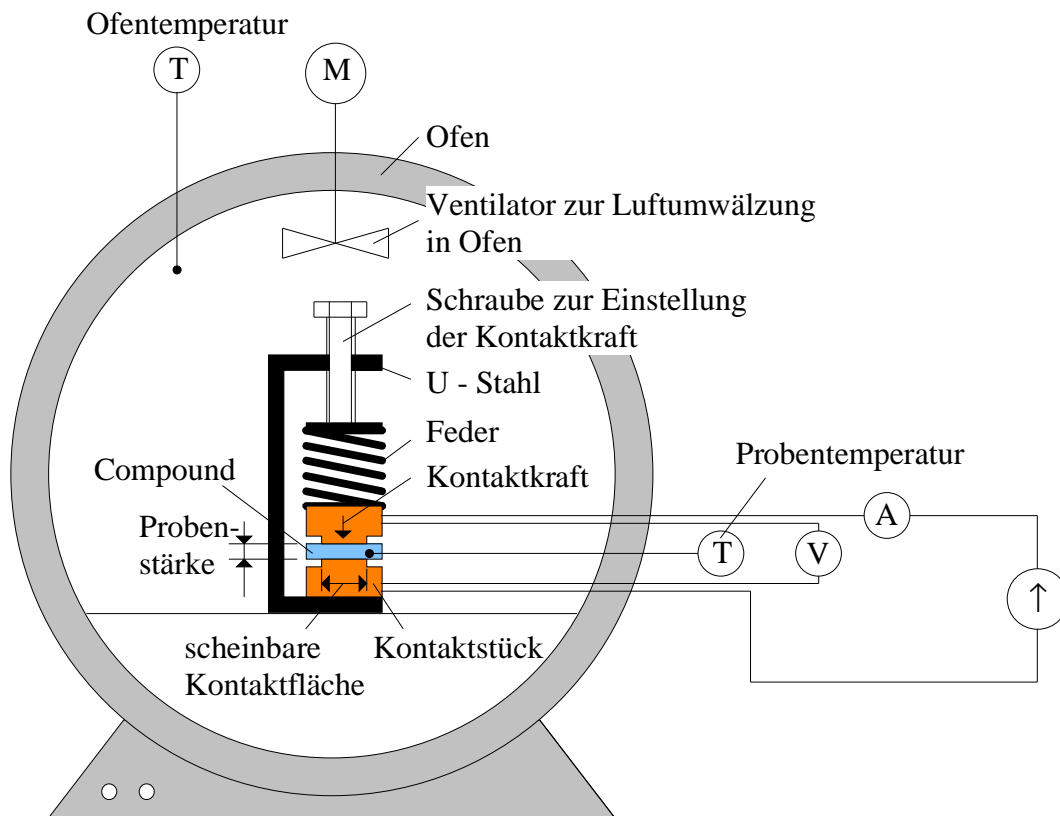


Abb. 88: Versuchsapparatur zur Bestimmung von $R(T)$ - Prinzipskizze

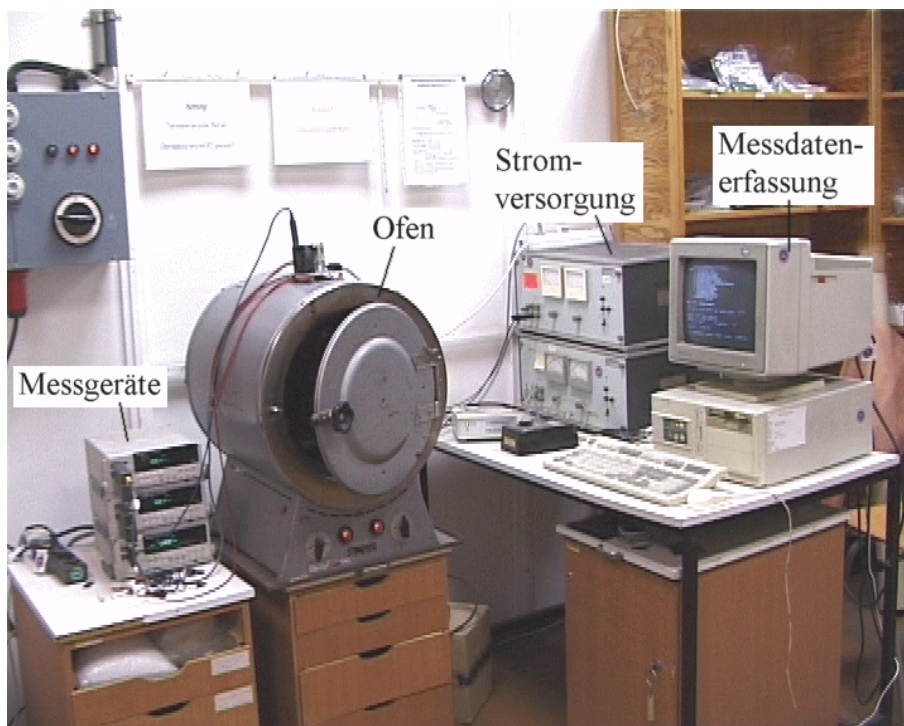


Abb. 89: Versuchsapparatur zur Bestimmung von $R(T)$ - Realisierung

Anhang 3: Utensilien zur Compoundherstellung

Die Compoundherstellung erfolgte mit einem Laborkneter der Marke Brabender (Abb. 90).

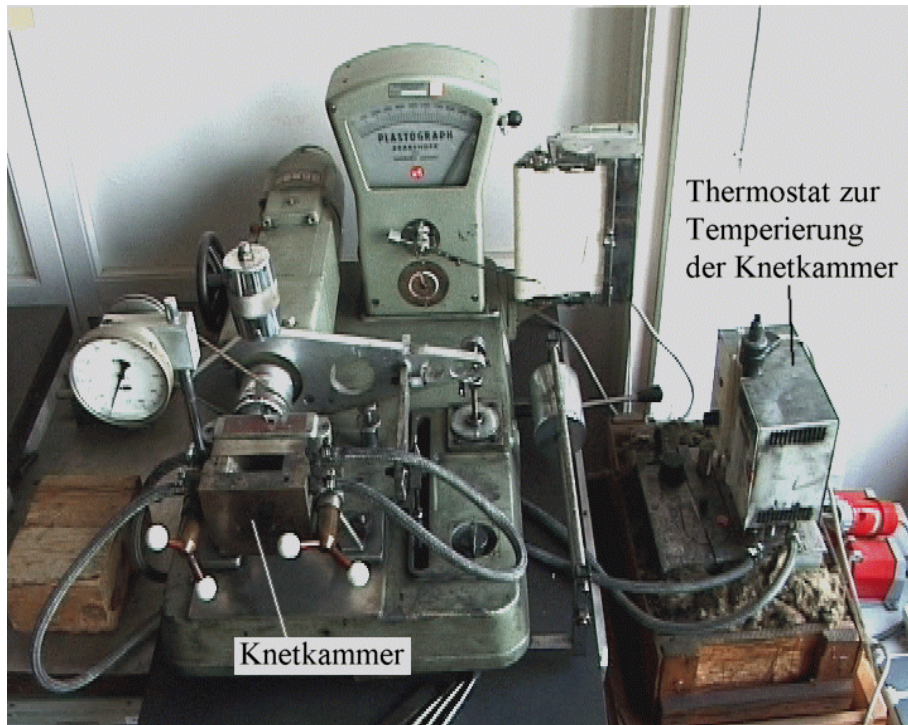
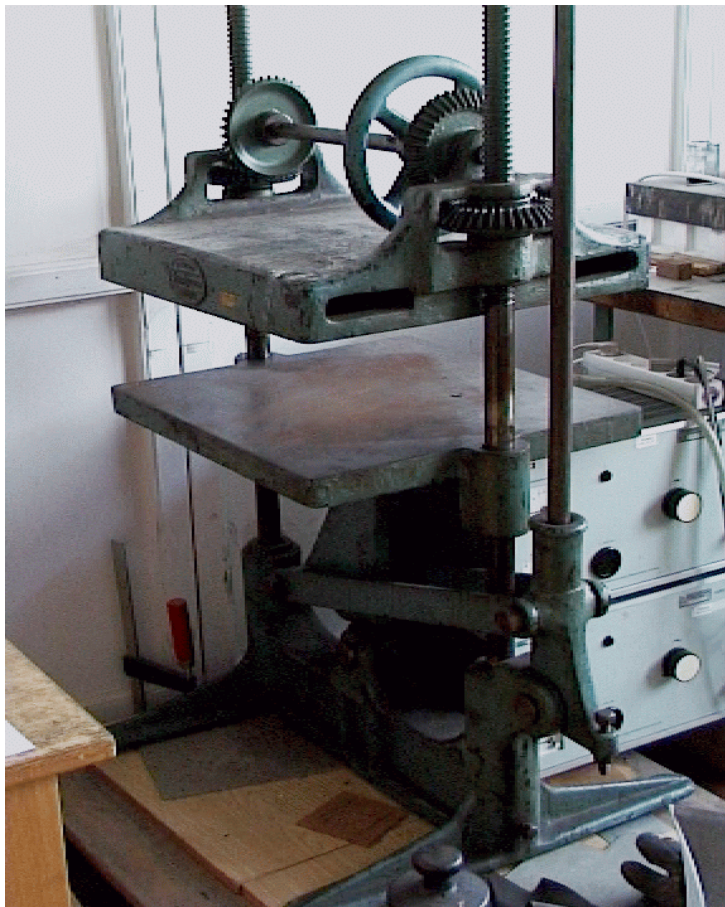


Abb. 90: Laborkneter



Das aus dem Kneter entnommene Compoundgranulat wird in eine Pressform gegeben und mit Hilfe einer Handhebelpresse zu einem Probekörper geformt (Abb. 91).

Abb. 91: Handhebelpresse

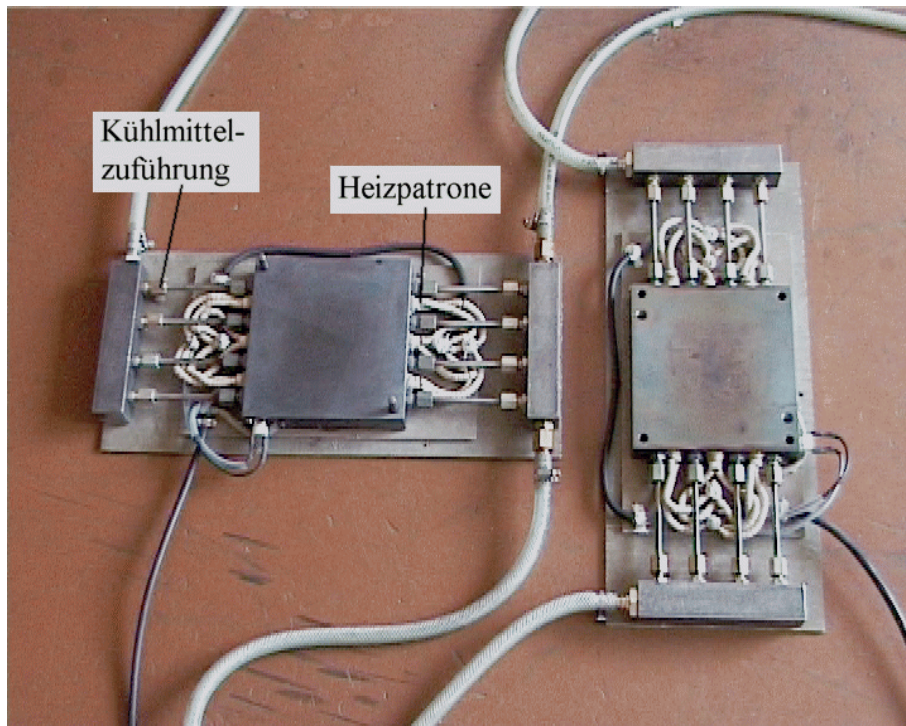


Abb. 92: Heiz- und kühlbare Pressplatten

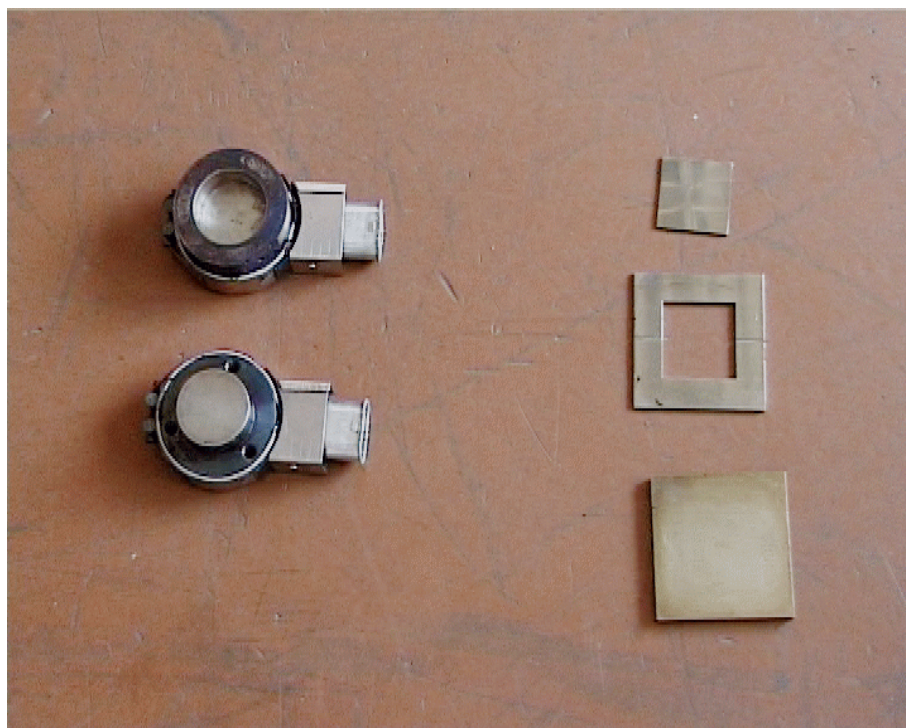


Abb. 93: Beheizbare Pressform / einfache Pressform

Anhang 4: Vier-Punkt-Messung zur Leitfähigkeitsbestimmung

Zur Bestimmung des wahren spezifischen Compoundwiderstands werden aus dem Rohmaterial Probestreifen geschnitten, die wie folgt zu konfektionieren sind (Abb. 94).

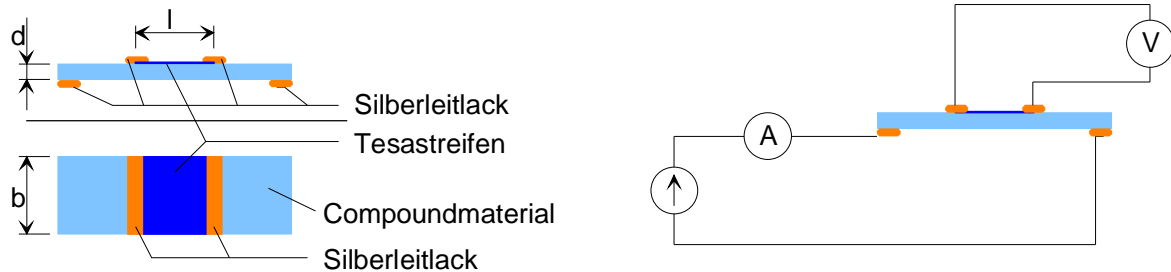


Abb. 94: Vier-Punkt-Messung am Compound

Die Gesamtlänge des Probestreifens muss groß gegenüber der Messlänge l (entspricht der Breite des Tesastreifens) gewählt werden. Dies ist erforderlich damit das elektrische Strömungsfeld im Bereich der Messlänge homogen ist. Handelt es sich um ein Compoundmaterial welches isotrop

ist, läßt sich der wahre spezifische Compoundwiderstand wie folgt ermitteln: $\rho_T = \frac{U}{I} \cdot \frac{b \cdot d}{l}$.

Beispiel:

Für $l = b = 10 \text{ mm}$ und $d = 1,3 \text{ mm}$ ergibt sich bei $U = 360 \text{ mV}$ und $I = 50 \text{ mA}$ ein wahrer spez. Compoundwiderstand $\rho_T = 0,94 \text{ } \Omega\text{cm}$.

Anhang 5: Leitfähigkeitsbestimmung von Ruß in Abhängigkeit des Drucks

Der Ruß wird, mittels eines kleinen Trichters, in das Glasröhrchen eingefüllt (Abb. 95). Der Innendurchmesser des Glasröhrchens beträgt 6,5 mm ($0,332 \text{ cm}^2$). Der aus Aluminium gefertigte Halteklötz verhindert ein Verkippeln des Glasröhrchens unter Druck. Das Längenverhältnis des Hebelarms beträgt 1 / 5. Durch ein 5 kg Wägestück sowie dem Eigengewicht von Hebelarm und Waagschale wird auf den Ruß ein Druck von 10,8 MPa ausgeübt.

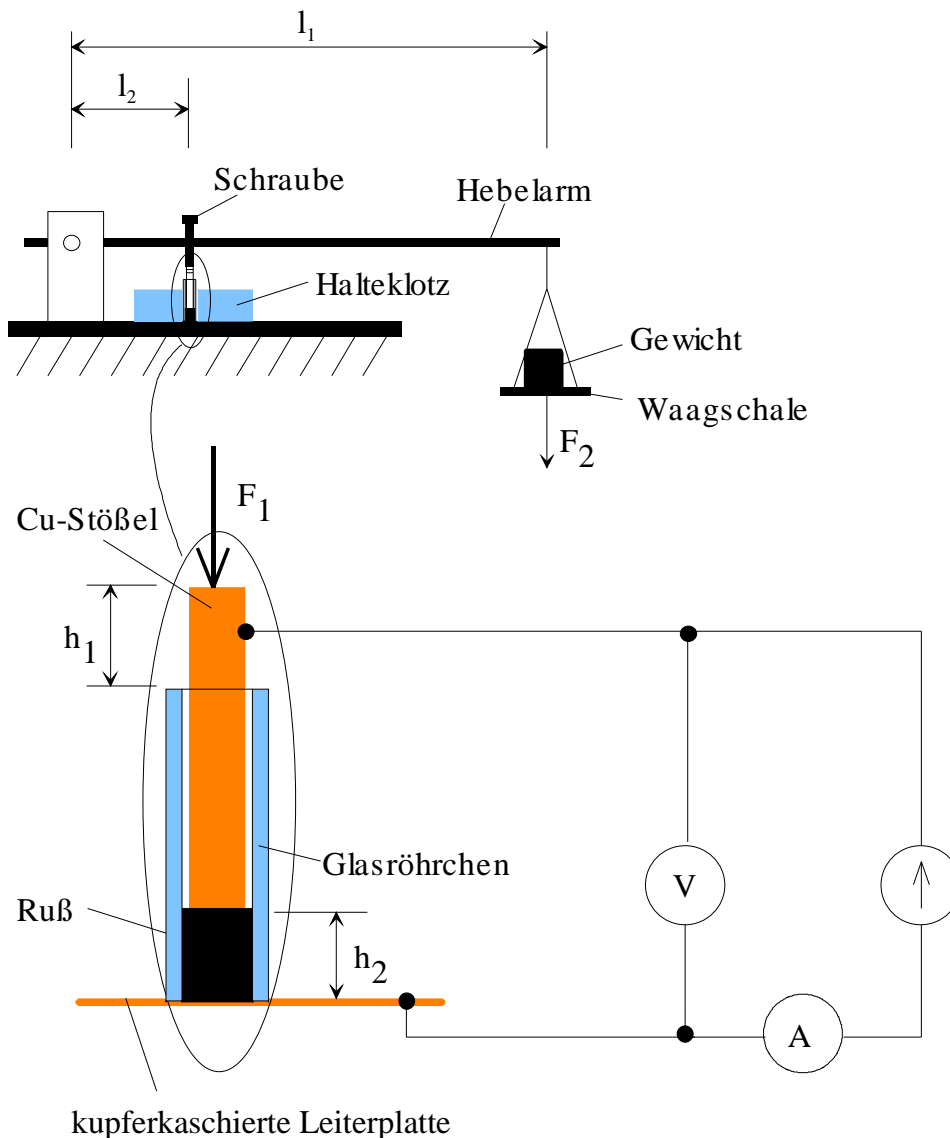


Abb. 95: Leitfähigkeitsbestimmung eines Pulvers in Abhängigkeit vom Druck

Beispiel:

Nachdem der Ruß in das Glasröhrchen eingefüllt und auf den Kupferstößel die entsprechende Kraft aufgebracht wurde, wird für h_1 ein Wert von 11,2 mm gemessen. Da das Glasröhrchen eine Länge von 50 mm und der Kupferstößel eine Länge von 55 mm aufweist, folgt $h_2 = 6,2 \text{ mm}$. Bei $I = 0,1 \text{ A}$ und $U = 18 \text{ mV}$ ergibt sich für die Leitfähigkeit des Rußes ein Wert von $0,096 \text{ } \Omega \text{ cm}$.

Anhang 6: Kraftkontaktierung

Die für die Kraftkontaktierung notwendige Kontaktkraft wird mit der Hilfe eines Schraubstocks aufgebracht (Abb. 96). Die elektrische Isolation der Kupferelektroden gegeneinander und gegenüber dem Schraubstock erfolgt durch 2 Hartpapierplatten. Um die Kontaktkraft möglichst homogen über die gesamte Elektrodenfläche zu verteilen, werden die beiden Hartpapierplatten von 2 Stahlplatten flankiert.

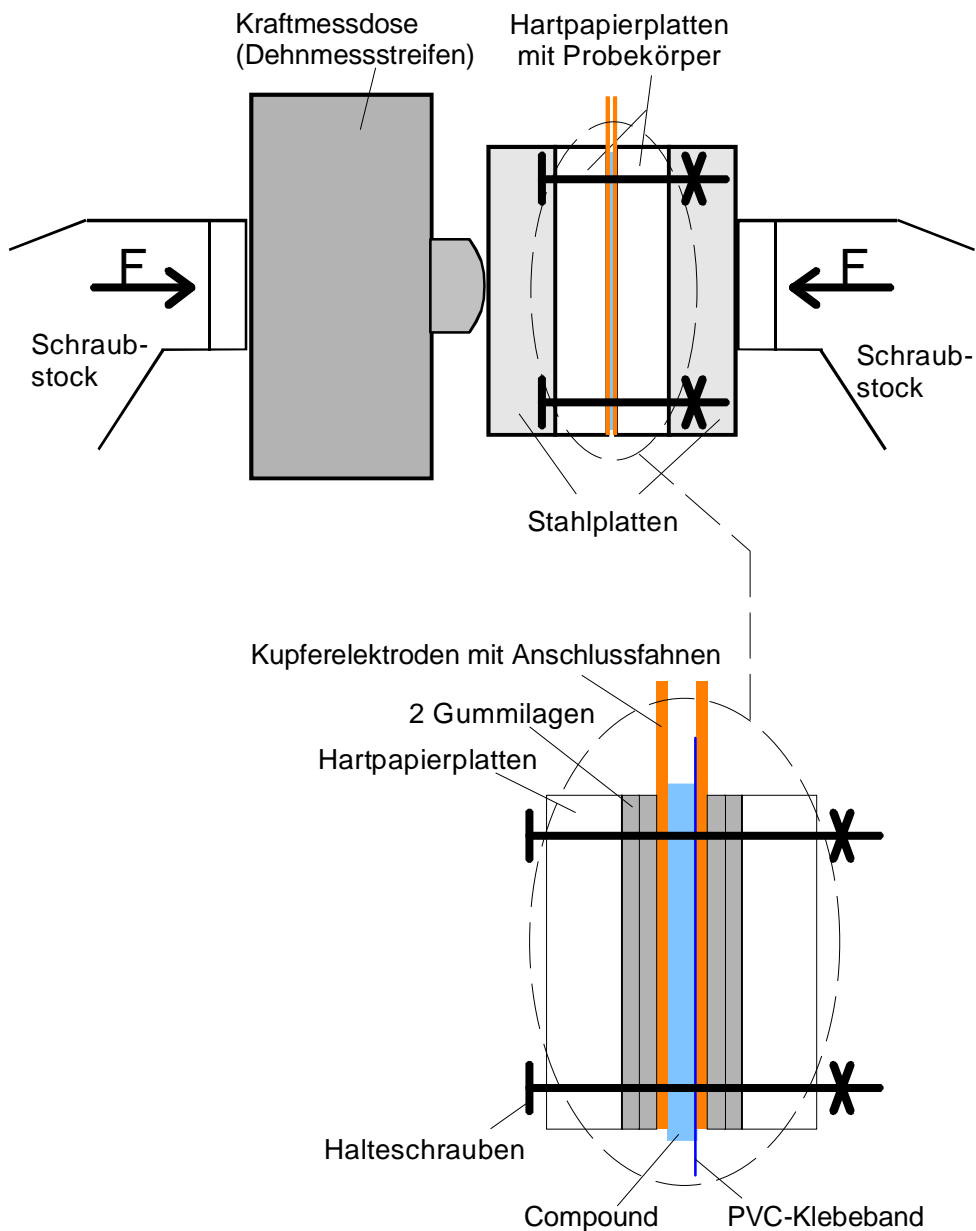


Abb. 96: Versuchsaufbau Kraftkontaktierung - Prinzipskizze

Zur Vermeidung von Kurzschlüssen zwischen den Kupferelektroden wird der Compoundrand mit PVC-Band abgeklebt. Die Größe des Compoundplättchens wird so gewählt, dass der Überstand über die Elektroden ca. 2 mm beträgt. Das PVC-Band wird auf den Rand bis ca. 1 mm unter die Elektrode geklebt.

Anhang 7-1: Modellierung eines Rußteilchens

Mit Hilfe der aus [11] bekannten TEM-Aufnahme (Abb. 97):

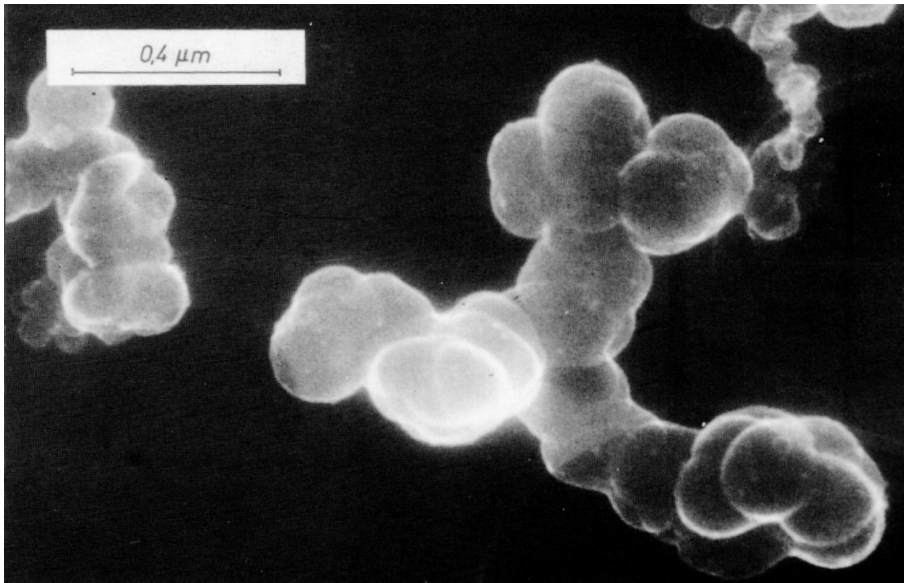


Abb. 97: Rußaggregat (nach [11])

wird durch Nachzeichnen und Umskalieren auf die Primärteilchengröße des verwendeten Acetylenrußes das Modellrußteilchen abgeleitet (Abb. 98):

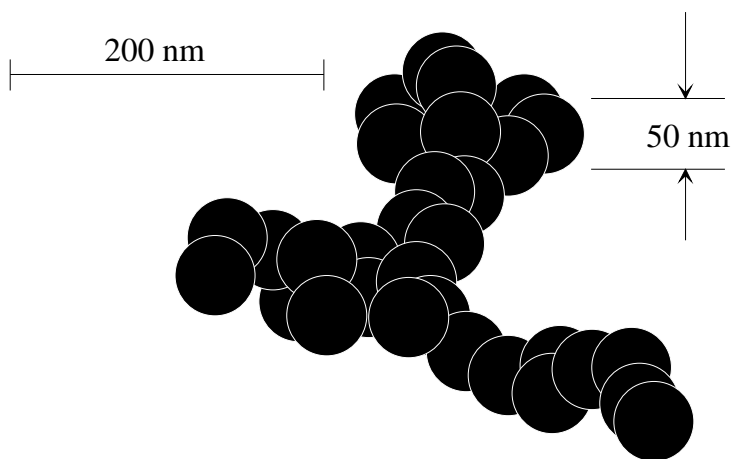


Abb. 98: Modellrußteilchen

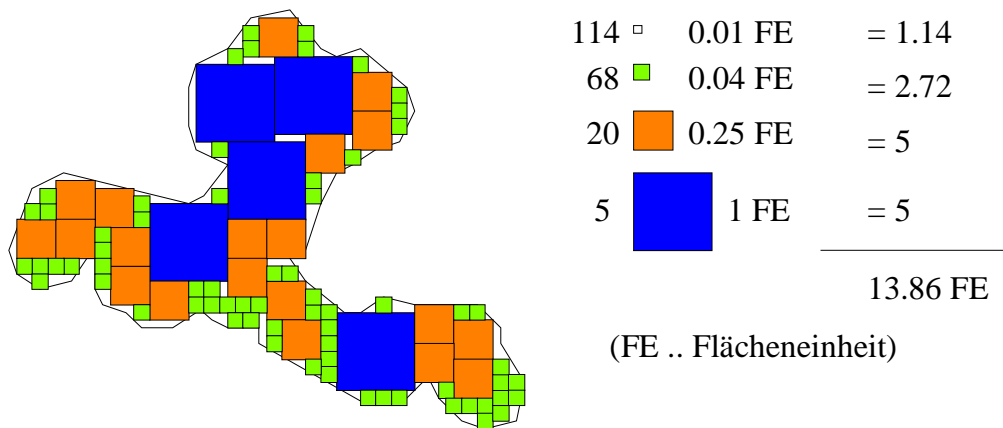


Abb. 99: Ermittlung der Größe des Modellrußteilchen

Durch das Auszählen des Flächeninhalts sowie unter Anwendung des für die Abbildung 46 (mikroskopisches Kontaktmodell) verwendeten Maßstabs ergibt sich für das Modellrußteilchen eine Größe von 13.86 Flächeneinheiten (Abb. 99).

Anhang 7-2: Bestimmung der Kristallinität von HDPE + 40 % Ruß

Die Dichte des verwendeten HDPE's beträgt 0.96 g/cm^3 . Laut Herstellerdatenblatt [9] folgt hieraus eine Kristallinität von 73 Vol% (siehe Abschnitt 3.3).

Als Ansatz zur Bestimmung der Kristallinität wird die zum Aufschmelzen der kristallinen Bereiche benötigte Energie genutzt. Da die Moleküle eines technischen Polyethylens unterschiedlich groß sind, sie also nicht eine bestimmte molare Masse besitzen, sondern mittels einer Molmassenverteilung charakterisiert werden, existiert kein bestimmter Schmelzpunkt sondern ein Schmelztemperaturbereich. Somit ist zur Bestimmung der zum Schmelzen der Sphärolithe notwendigen Energie (W^*) die Energie abzuziehen, die benötigt wird um die amorphen Bereiche zu erwärmen: $W^* = \int (c - c_{\text{AMORPH}}) dT$. Die Bestimmung der Wärmekapazität erfolgt mit Hilfe einer DSC-Messung (Abb. 100).

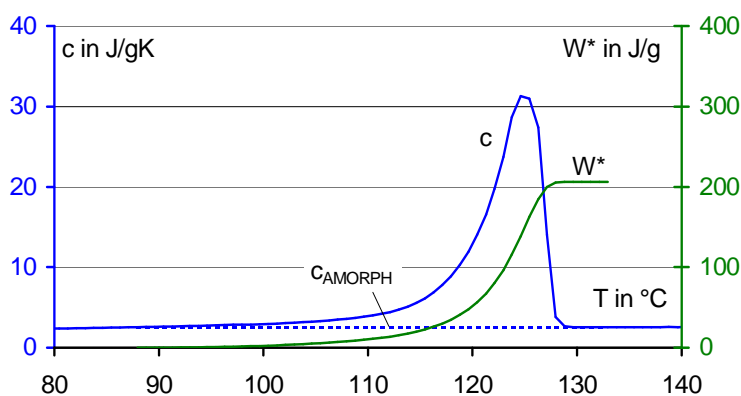


Abb. 100: Ermittlung der zum Schmelzen der kristallinen Bereiche notwendigen Energiemenge für ungefülltes HDPE

Verbindet man die Messwerte der Wärmekapazität vor und nach dem Schmelzpeak mit einer Geraden, erhält man die Werte für c_{AMORPH} . Für das in dieser Arbeit verwendete HDPE ergibt sich zum Schmelzen der Sphärolithe eine spezifische Energiemenge von 206 J/g. Laut [31] beträgt die spezifische Schmelzenthalpie von 100 Vol% kristallinem PE 293 J/g. Hieraus folgt ein Kristallinitätsgrad von 70 Vol%.

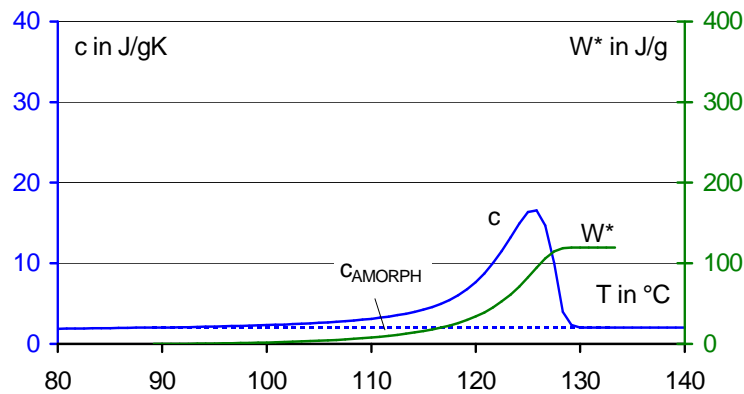


Abb. 101: Ermittlung der zum Schmelzen der kristallinen Bereiche notwendigen Energiemenge für HDPE + 40 Mas% Ruß

Wie unter anderen in [12] ausgeführt, besitzt Ruß eine nukleierende Wirkung. Somit wäre für das verwendete HDPE + 40 Mas% Ruß zu überprüfen, wie groß der Einfluß des Rußes auf die Kristallinität des Matrixwerkstoffs ist. Untersucht man das Compound HDPE + 40 Mas% Ruß erhält man das in Abbildung 101 dargestellte Ergebnis. Die zum Schmelzen der Sphärolithe notwendige Energie beträgt hier 120 J/g. Unter Beachtung der Massenrelation folgt hieraus ein Kristallinitätsgrad von 71 Vol%.

Somit kann festgestellt werden, dass die Höhe der Rußfüllung beim verwendeten HDPE keinen Einfluß auf den Kristallinitätsgrad hat.

Anhang 7-3: Abschätzung der Sphärolithgröße von HDPE

Üblicherweise erfolgt die Beurteilung der Sphärolithgröße von teilkristallinen Kunststoffen mittels eines Polarisationsmikroskops. Da bei PE die Größe der Sphärolithe im Bereich der Auflösung von Lichtmikroskopen liegen, schlägt diese Methode fehl. So wurde in [46] zur Abbildung von PE - Sphärolithen ein anderer Weg beschritten. Man ätzt die Oberfläche einer PE Probe drei Minuten bei 70 °C mit CCl₄ an. Die so präparierte Oberfläche wird metallisch bedampft und mittels eines Elektronenmikroskops betrachtet (Abb. 102).

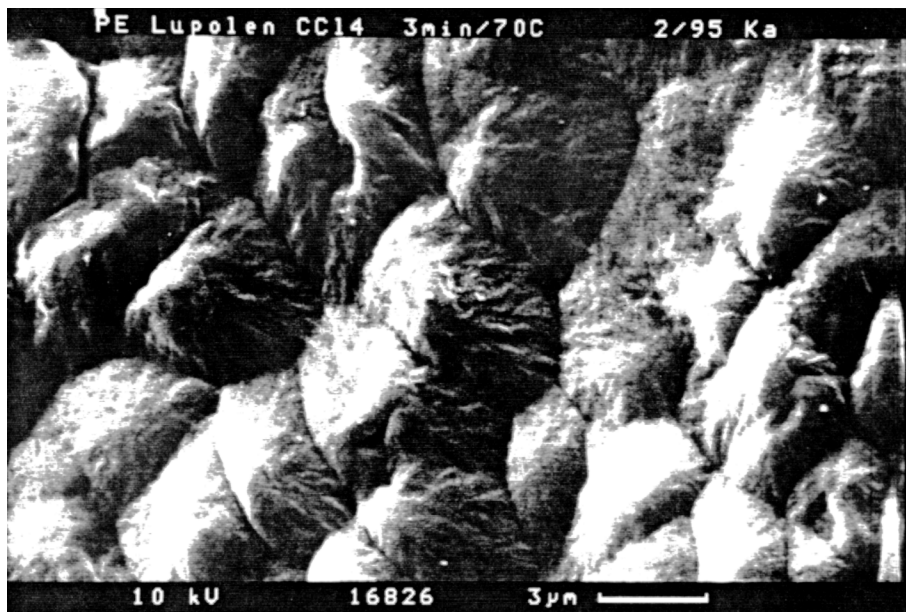


Abb. 102: Sphärolithe in HDPE (nach [46])

Für die Sphärolithgröße von HDPE wird so ein Wert im Bereich 2 ... 4 µm festgestellt.

Anhang 7-4: Beschreibung der Randzone teilkristalliner Kunststoffe

Die prinzipiellen Gegebenheiten im Bereich der Randzone teilkristalliner Kunststoffe zeigt das Mikroskopbild (Abb. 103):

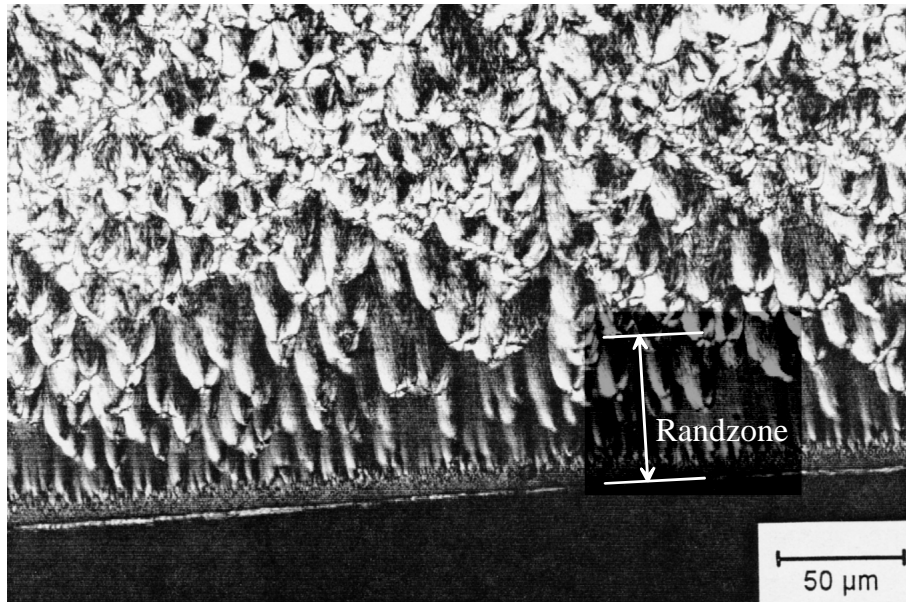


Abb. 103: Randzone am Beispiel von POM (nach [46])

Je mehr man sich bei der Betrachtung dem Rand des Kunststoffs nähert, desto geringer wird die Anzahl und die Größe der Sphärolithe. Die Dicke der Randzone beträgt im Fall von POM ca. 70 µm. Um einen Eindruck von der POM-Sphärolithgröße zu bekommen, wird das nachfolgend dargestellte REM - Bild (Abb. 104) betrachtet.

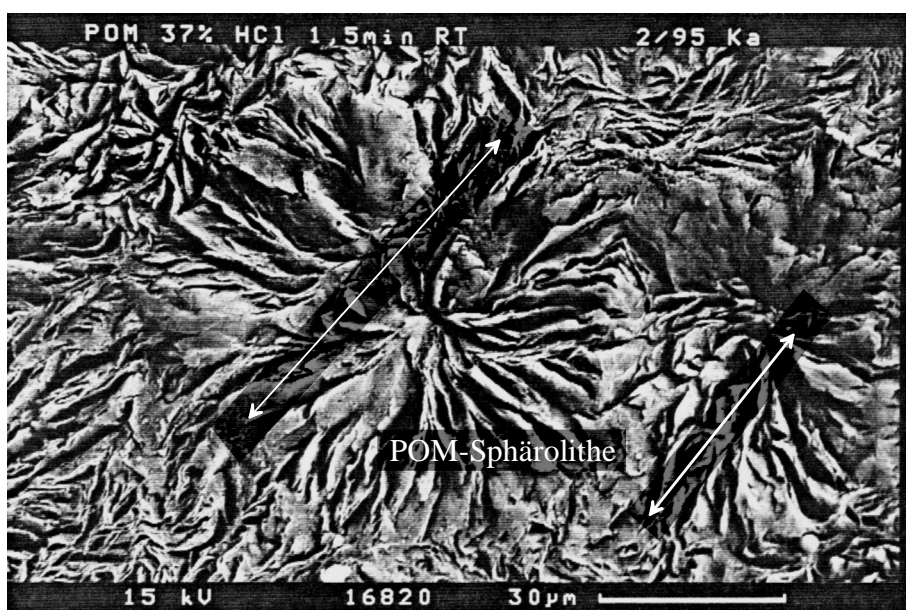


Abb. 104: POM-Sphärolithe (nach [46])

Der Durchmesser der POM-Sphärolithe liegt in der Größenordnung 30 .. 50 μm .

Entsprechend [4] wird bei PA eine 15 ... 20 μm dicke, amorphe bis niedrigkristalline, nichtsphärolithische Randschicht beobachtet. Die Sphärolithgröße von PA liegt in der Größenordnung von 15 μm .

Es wird somit festgestellt, dass die Dicke der Randzone in der Größenordnung des 1 ... 1,5fachen der Sphärolithgröße liegt.

Bei PE ist somit mit einer Stärke der Randzone von ca. 3 μm zu rechnen.

Anhang 7-5: Kristallinität der Randzone

Um den Sphärolithgehalt in der Compoundrandzone abschätzen zu können, wird die Oberfläche einer Probe HDPE + 40 Mas% Ruß im REM betrachtet (Abb. 105).

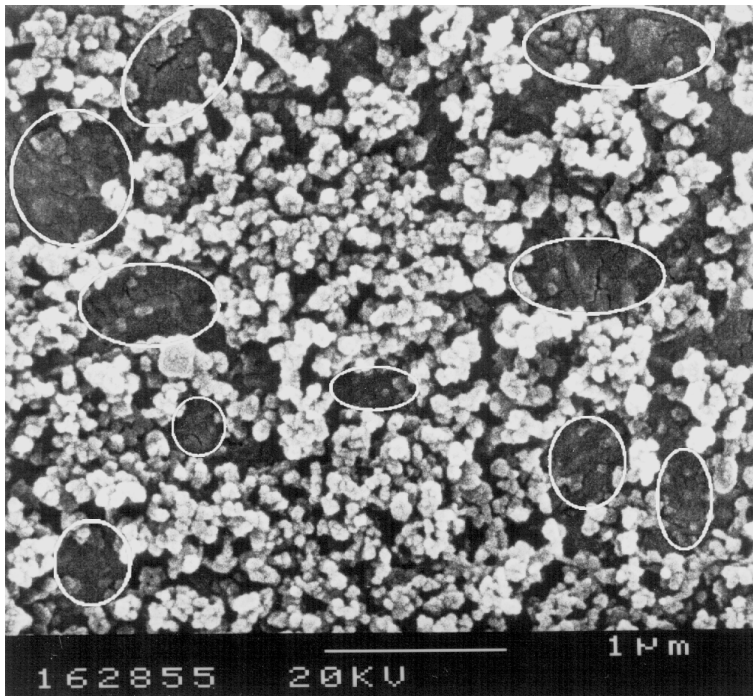


Abb. 105: Oberfläche von HDPE + 40 Mas% Ruß

Im REM werden nur Strukturen abgebildet, die elektrisch leitfähig sind. Deswegen sind die Rußaggregate, die sich an der Oberfläche befinden, gut sichtbar. Ebenfalls erkennbar sind die ca. 50 nm großen Primärteilchen, aus denen die Rußaggregate bestehen. Da sich die leitfähigen Rußpartikel außerhalb der Sphärolithe befinden, sind in der REM-Aufnahme dunkle, nahezu rußteilchenfreie Gebiete zu erkennen. Bei diesen - durch Ellipsen gekennzeichneten - Gebieten handelt es sich um die Sphärolithe der Randzone. Im Verhältnis zur Gesamtfläche beträgt dieser Anteil 16 Vol%. Da der Anteil des Rußes 30 Vol% und somit der Matrixanteil 70 Vol% ausmacht, ergibt sich für die Kristallinität der Matrix in der Randzone 23 Vol%.

Die Größe und Form der Sphärolithe streut beträchtlich. Zur Orientierung für die Größe eines Modellsphäroliths für die Randzone kann 0,5 µm bis 1 µm angegeben werden.

Anhang 8: Versuchsaufbau für Hochstromuntersuchungen

Die Verbindung vom 10/0,66 kV-Transformator (1 MVA, $u_K = 6\%$) zum Versuchsplatz (Abb. 106) besteht aus jeweils 4 x 185 mm² Aluminiumkabel. Nach dem Sicherheitsschalter (Abb. 107) stehen an den Primärklemmen des Prüftransformators als Spitzenwert für den prospektiven Strom 16 kA zur Verfügung. Beim Prüftransformator handelt es sich um einen Einphasentransformator mit einem Übersetzungsverhältnis von 3:1, einer Leistung von 15 MVA und einer Kurzschlussspannung u_K von 12 %. Als Draufscharter wird ein Thyristor verwendet. Er besteht aus insgesamt 10 parallelgeschalteten Einzelthyristoren. Die Hälfte dieser Thyristoren besitzt einen Nennstrom von 800 A, die andere Hälfte einen von 630 A. Wahlweise kann über das Einschalten von Widerständen in den Kreis der Strom zwischen 0,3 ... 50 kA Spitzenwert eingestellt werden. Weiterhin ist über die Wahl des Einschaltwinkels in 2° Stufen eine sehr feinstufige Einstellung der Prüflingsbelastung möglich. Die hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Einschaltwinkels wird durch einen auf die Grundwelle der Netzfrequenz eingerastenden Phasenregelkreis sichergestellt.

Das verwendete Transientenrecordersystem der Firma Krenz besitzt 8 isolierte Kanäle, eine Auflösung von 12 Bit und eine maximale Abtastrate von 10⁶ s⁻¹. Die maximal zwischen den Eingängen zulässige Spannungsdifferenz beträgt 750 V, so dass in der Regel ohne zusätzliche Isolierverstärker gemessen wurde.

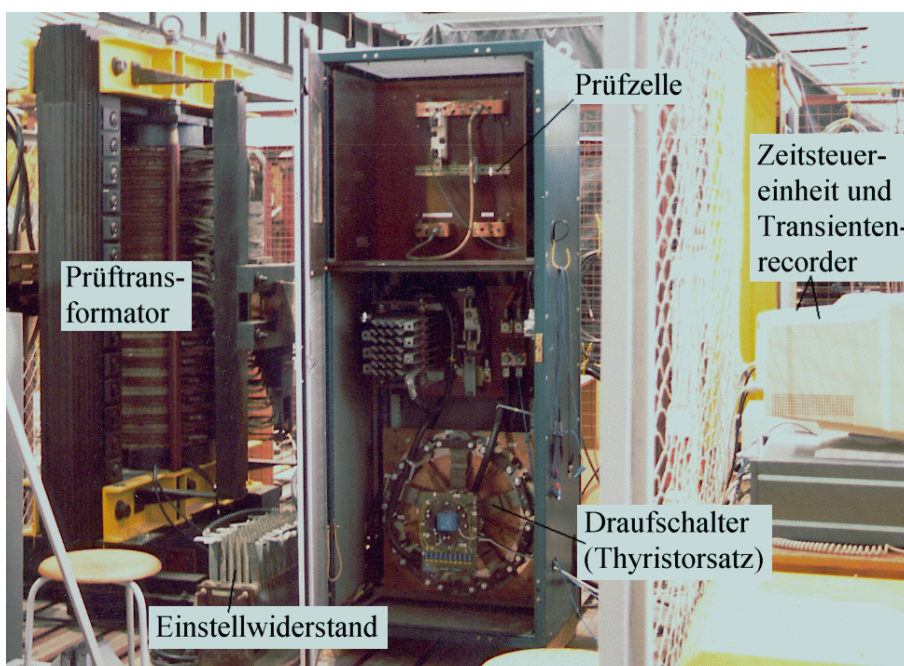
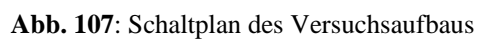


Abb. 106: Versuchsplatz für die Hochstromuntersuchungen



Anhang 9: Simulationsmodell für den PTC-Effekt bei Hochstrombelastung

Mit diesem Modell ist das Verhalten eines polymeren Strombegrenzers bestimmbar, wenn angenommen wird, dass:

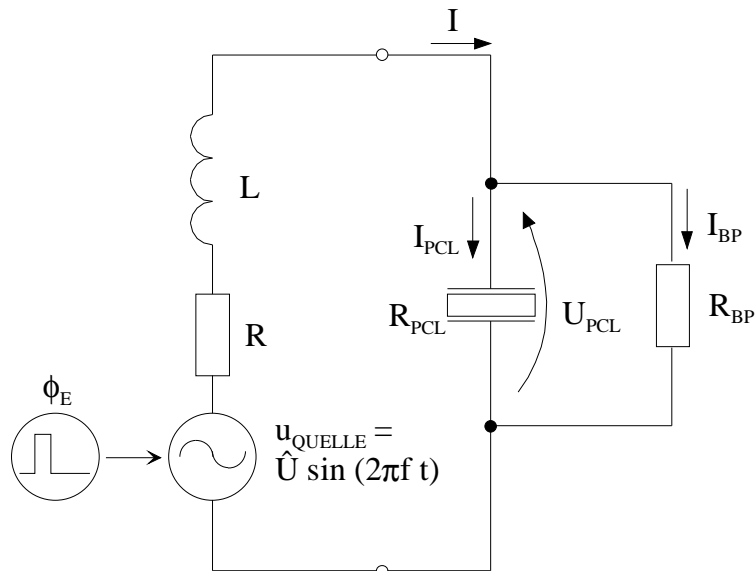
- der Widerstandsanstieg auf dem PTC-Effekt beruht,
- die Erwärmung des Probekörpers adiabatisch erfolgt und
- die Verwendung konzentrierter Parameter zulässig ist (d.h. die Erwärmung im betrachteten Volumen homogen erfolgt).

Zur Parametrierung des Modells notwendige Größen sind:

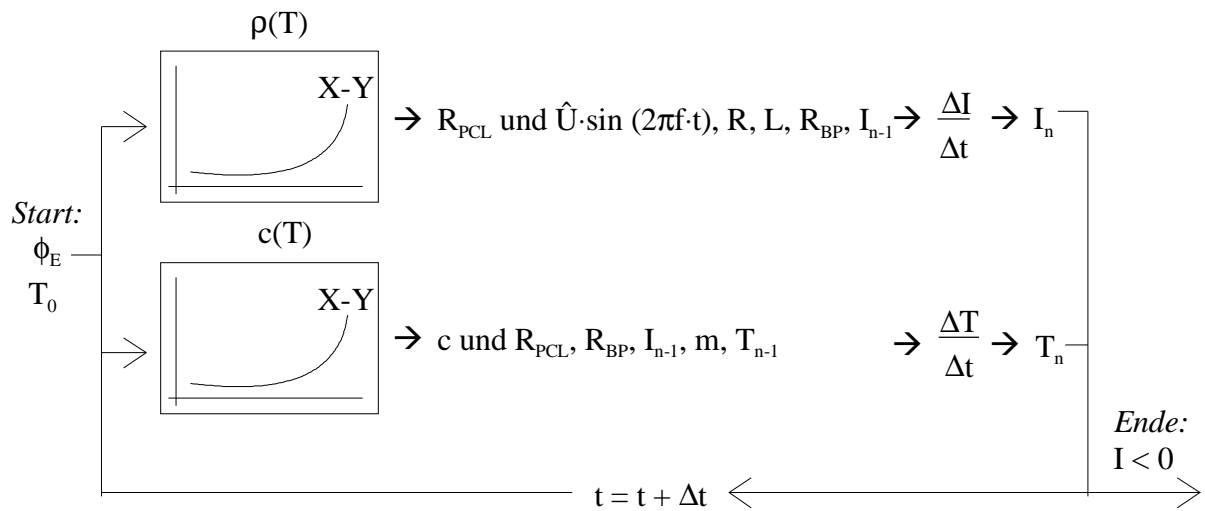
- L , R , \hat{U} und f des Prüfstromkreises,
- T_0 .. Anfangstemperatur, Umgebungstemperatur (23 °C),
- $\rho(T)$.. Abhängigkeit des Compoundwiderstands von der Temperatur,
- $c(T)$.. Abhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität des Compounds von der Temperatur,
- Breite, Länge, Dicke und Dichte des Compounds,
- Δt .. Zeitschritt,
- R_{BP} .. Parallelwiderstand des polymeren Strombegrenzers und
- ϕ_E .. Einschaltwinkel.

Ersatzschaltbild

des Versuchsaufbaus:



Rechenalgorithmus:



Formeln:

$$(1) \quad R = \frac{\rho \cdot d}{A}$$

$$(2) \text{ aus } L \frac{di}{dt} = u_L \quad \text{und} \quad u_L = u_{\text{QUELLE}} - (i \cdot R + i \cdot (R_{PCL} \parallel R_{BP})) \quad \text{mit} \quad u_{\text{QUELLE}} = \hat{U} \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \phi_E)$$

$$\text{folgt } \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{u_{\text{QUELLE}} - i \cdot (R + R_{PCL} \parallel R_{BP})}{L}$$

$$(3) \text{ aus } \Delta W = P \cdot \Delta t; \quad \Delta W = m \cdot c \cdot \Delta T \quad \text{und} \quad P_{PCL} = R_{PCL} \cdot I_{PCL}^2 \quad \text{folgt} \quad \frac{\Delta T}{\Delta t} = I_{PCL}^2 \frac{R_{PCL}}{m \cdot c}$$

$$\text{und schließlich } \frac{\Delta T}{\Delta t} = (I \cdot \frac{R_{BP}}{R_{PCL} + R_{BP}})^2 \frac{R_{PCL}}{m \cdot c}$$

Anhang 10: Phasenverschiebung zwischen Kraft und Widerstand

Zur dynamischen Kraftbestimmung wurde der Versuchsaufbau entsprechend Anhang 6 wie folgt modifiziert (Abb. 108):

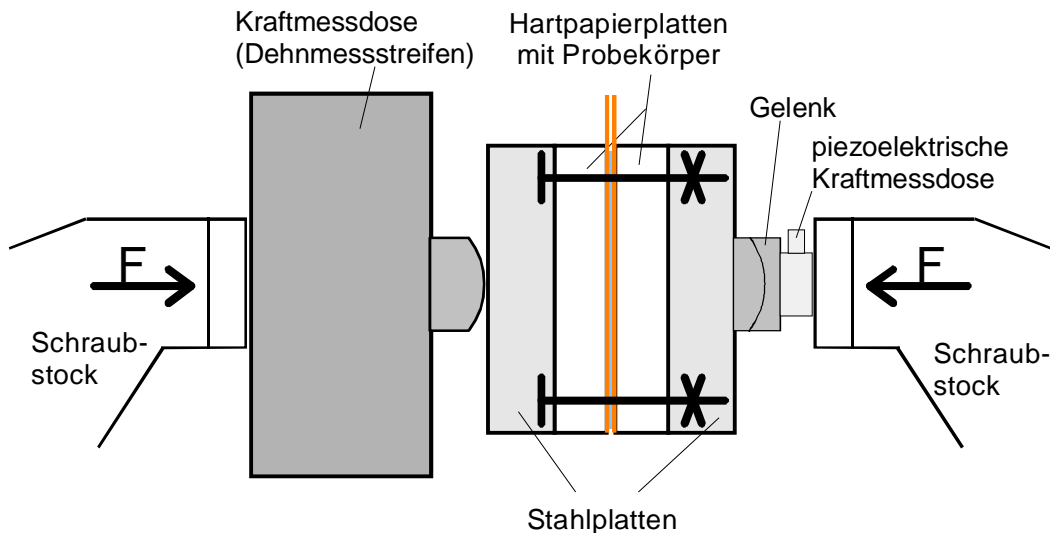


Abb. 108: Messaufbau für dynamische Kraftmessungen

Wird in die Compoundmitte eine Symmetrielinie gelegt, lässt sich für die rechte Seite das folgende, vereinfachte mechanische Ersatzschaltbild aufstellen (Abb. 109):

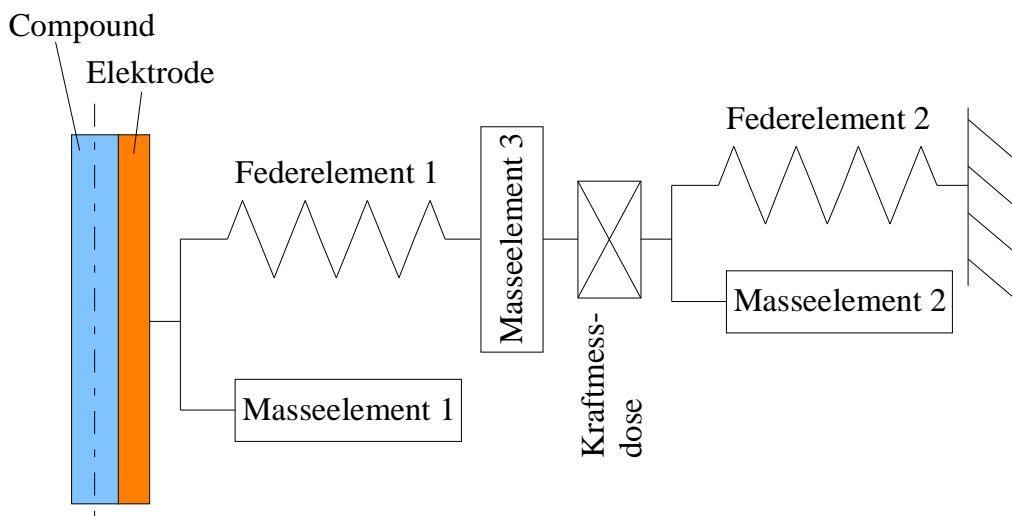


Abb. 109: Mechanisches Ersatzschaltbild

Dabei gelten die Zuordnungen:

- Feder- und Masseelement 1: Gummilage, Elektrode,
- Feder- und Masseelement 2: Schraubstock und
- Masseelement 3: Druckplatten, Gelenk.

Zur Abschätzung der Fehlergrenzen für die Phasenverschiebung zwischen Kraft und Widerstand werden zwei Fälle betrachtet:

1. In Folge der großen Masse von Element 2 wird dieses als unbeweglich angesehen.
2. Element 2 bewegt sich. Bedingt durch die große Masse dieses Elements können die anderen Elemente vernachlässigt werden.

zu 1.

Gemäß der getroffenen Annahme lässt sich das mechanische Ersatzschaltbild wie folgt weiter vereinfachen (Abb. 110):

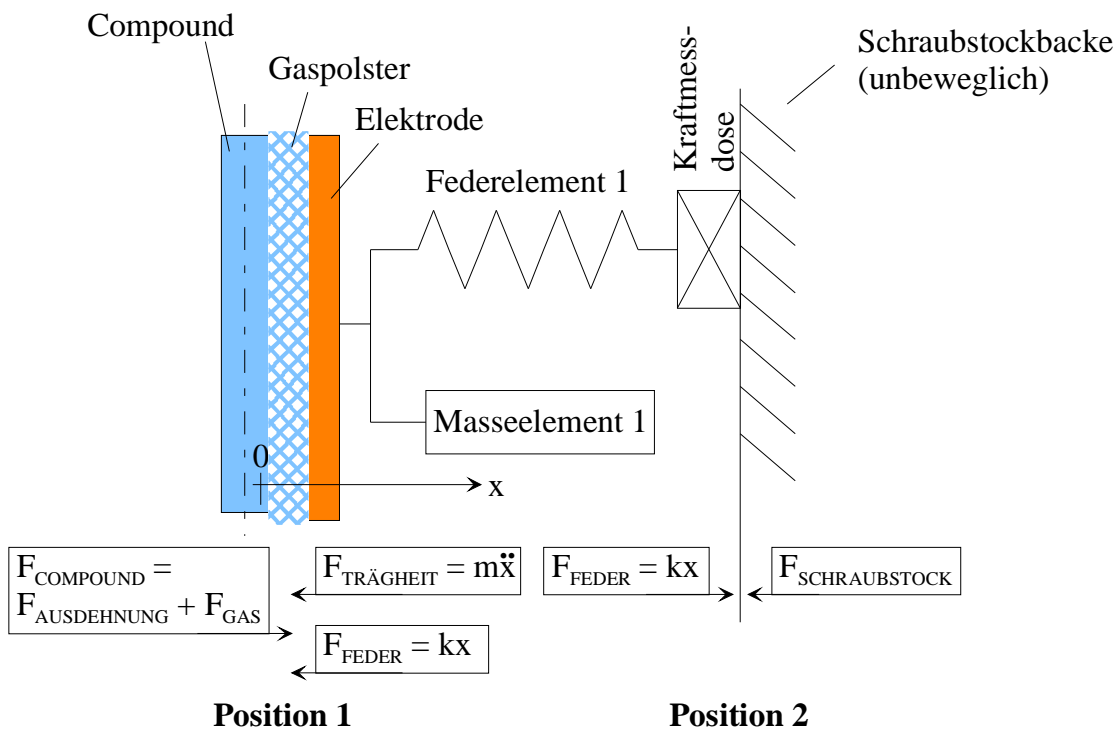


Abb. 110: Mechanisches Ersatzschaltbild gemäß Annahme 1

Position 1: Während des Ansprechens wird die Elektrode durch die thermische Ausdehnung des Compounds sowie durch den Druck des Zersetzungsgases aus ihrer Ruheposition ausgelenkt. Dieser Auslenkung wirken die Trägheit der Elektrode sowie die Federkraft der Gummilagen entgegen. Gemessen wird die Kraft jedoch nicht an dieser Stelle sondern hinter dem Federelement (**Position 2**). Die hier wirkende Kraft ist proportional dem Weg. Die Konsequenz daraus wäre, dass die gemessene Kraft nicht kleiner als Null (d.h. Weg kleiner Null) werden dürfte. Dies stimmt jedoch nicht mit der Messung überein (siehe Schaltversuch 20523, Abb. 61)! Die Schraubstockbacken können somit nicht als starr angesehen werden.

zu 2.

Gemäß der alternativ getroffenen Annahme lässt sich das mechanische Ersatzschaltbild zum zweiten wie folgt weiter vereinfachen (Abb. 111):

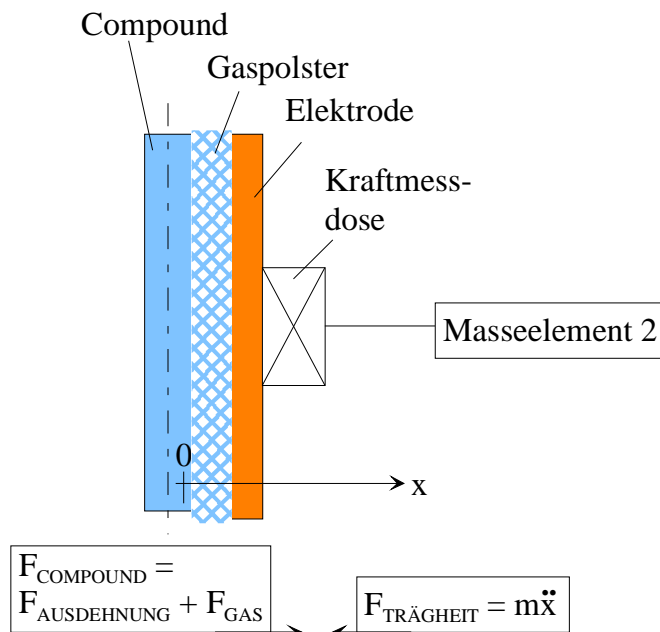


Abb. 111: Mechanisches Ersatzschaltbild gemäß Annahme 2

Vernachlässigt man die Ausdehnung des Compounds gegenüber der Abhebung der Elektroden erhält man durch Integration über die Zeit das folgende Bild (Abb. 112):

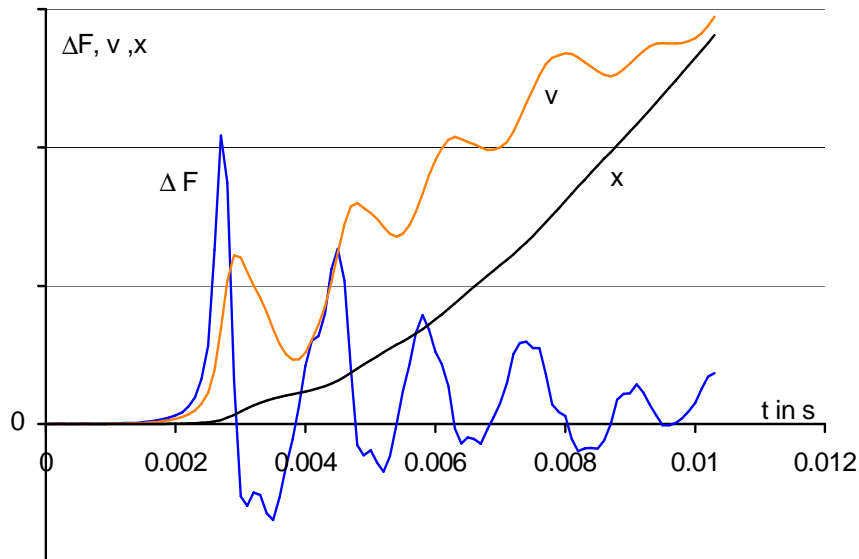


Abb. 112: Ermittlung der Abhebung aus der Kraft gemäß Annahme 2

Wie man sieht, weicht das Ergebnis dieser Betrachtung stark von den realen Gegebenheiten ab. Es wäre zu erwarten, dass gegen Ende des Schaltversuchs Geschwindigkeit und Weg wieder Werte nahe Null erreichen. Die Ausdehnung des Compounds muss somit mit in Ansatz gebracht werden. Das heißt von der während des Schaltversuchs registrierten gesamten Kraftänderung (ΔF_{GESAMT}) ist der Anteil abzuziehen, welcher von der Compoundausdehnung ($F_{\text{AUSDEHNUNG}}$)

herrührt.

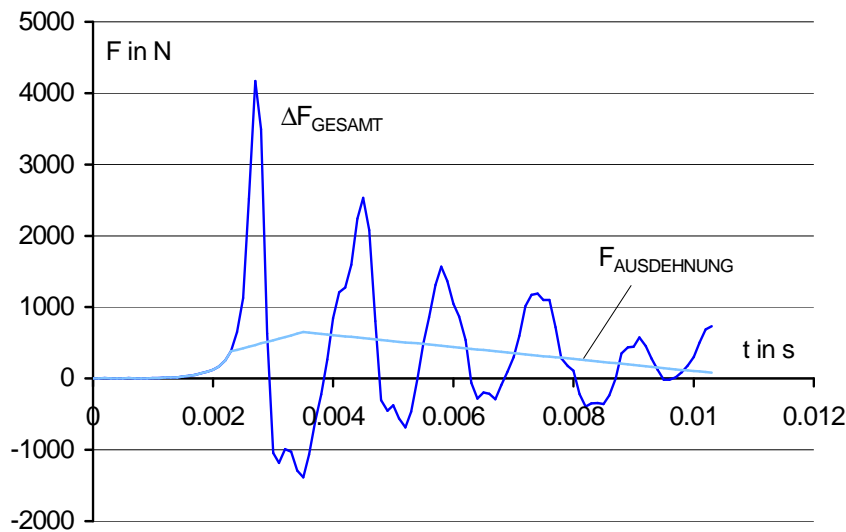


Abb. 113: Durch die Compoundausdehnung verursachter Kraftanteil

Zu Beginn des Schaltversuchs, noch bevor es zu einem Abheben der Elektroden kommt, entspricht die Änderung der gesamten Kontaktkraft ΔF_{GESAMT} der Volumenzunahme des Compounds (Abb. 113). Somit wird bis 2,3 ms diese Kraft gleich der Änderung der gesamten Kontaktkraft $F_{\text{AUSDEHNUNG}} = \Delta F_{\text{GESAMT}}$ gesetzt. Im weiteren Verlauf dehnt sich das Compound als Folge der anhaltenden Energiezufuhr weiter aus. Durch das Schmelzen der Sphärolithe kommt es im Bereich von 2 bis 5 ms zu einer vermehrten Volumenzunahme (Auftreten des PTC-Effekts im Volumen; siehe Abschnitt 6.4.3.4, Abb. 66). Gleichzeitig dazu wird jedoch - bedingt durch den Oberflächeneffekt - Materialverlust (Materialabbrand) beobachtet. Um diese beiden gegenläufigen Prozesse in Ansatz zu bringen, wird angenommen, dass bei $t = 3,5$ ms der von der Volumenänderung verursachte Kraftanteil sein Maximum erreicht. Die Höhe des Maximums ergibt sich aus dem Zusammenhang des Ausdehnungskoeffizienten mit der Temperatur $\alpha(T)$ (siehe Bild 14) und der Federkonstanten des Federelements 1 von $18 \text{ N}/\mu\text{m}$ zu 650 N . Integriert man die somit gewonnene Differenz $F_{\text{RESULTIEREND}} = \Delta F_{\text{GESAMT}} - F_{\text{AUSDEHNUNG}}$ zweimal über die Zeit, erhält man für den Zusammenhang von Kraft, Widerstand und der Abhebehöhe der Elektroden das folgende Bild (Abb. 114):

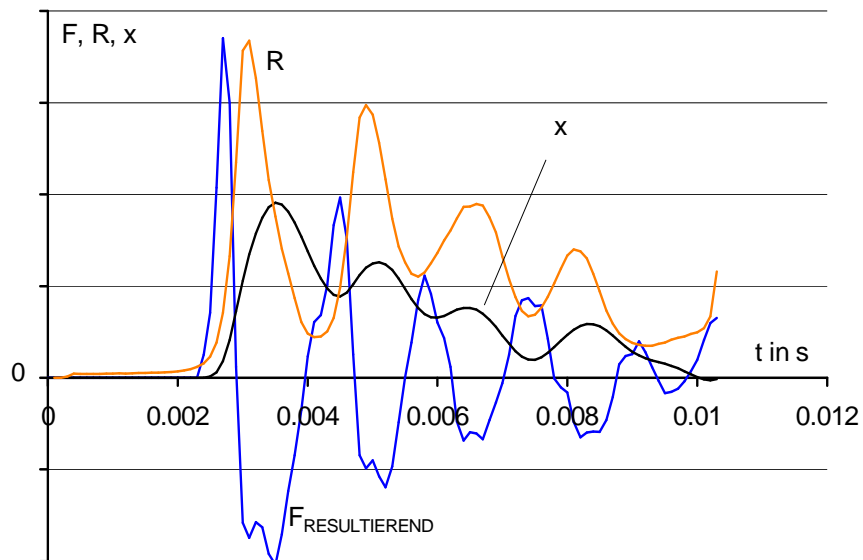


Abb. 114: Ermittlung der Abhebung aus der Kraft gemäß Annahme 2 unter Berücksichtigung der Compoundausdehnung

Während aus dem Ansatz 1 der Zusammenhang $F \sim x$ und somit ein Nacheilen des Widerstands hinter dem Weg folgt, ergibt sich bei dem Ansatz 2 ein Voreilen des Widerstands vor dem Weg. Insgesamt bringt jedoch der 2. Ansatz brauchbarere Ergebnisse. Somit kann festgestellt werden, dass das mechanische Verhalten hauptsächlich von der mechanischen Trägheit bestimmt wird.

Anhang 11: Hochgeschwindigkeitsvideoaufzeichnungen

Der nachfolgend dargestellte Schaltversuch (Abb. 115 & 116) wurde im Prüflaboratorium der Firma Moeller GmbH Bonn durchgeführt. Die Bildfolgefrequenz beträgt 4500 s^{-1} . Die Synchronisation zwischen den Messschrieben und dem Video erfolgte mit einer Blitzlampe.

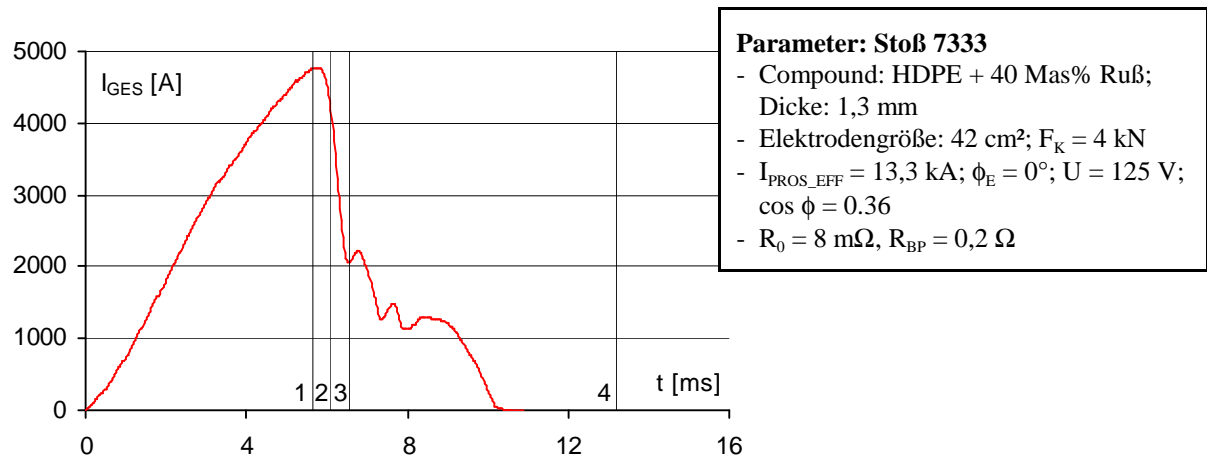


Abb. 115: Strommessschrieb des Stoßes 7333

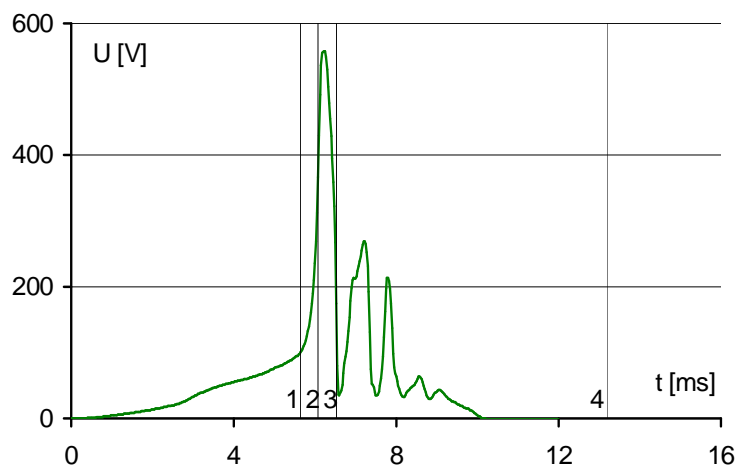


Abb. 116: Spannungsmessschrieb des Stoßes 7333

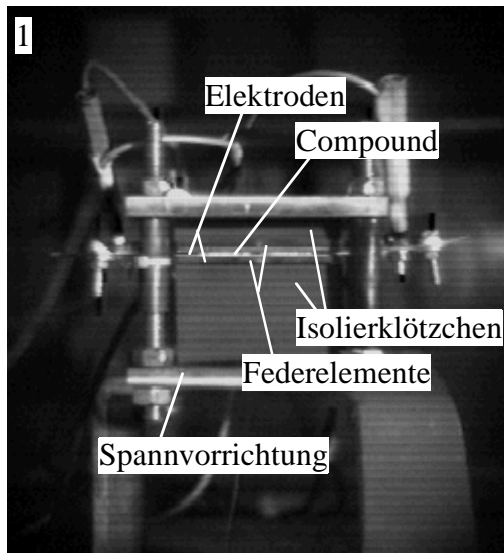


Abb. 117: Aufnahme zum Zeitpunkt 1

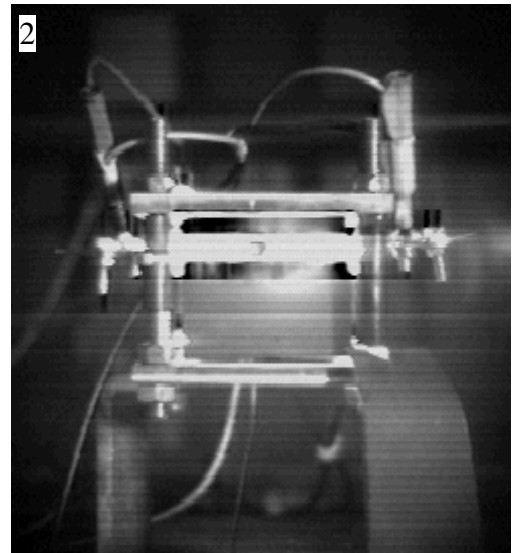


Abb. 118: Aufnahme zum Zeitpunkt 2

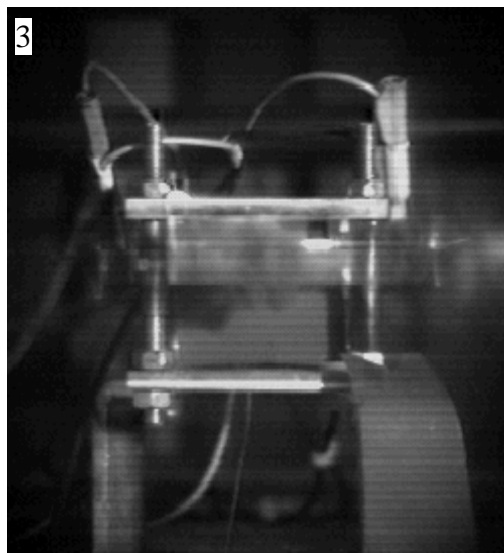


Abb. 119: Aufnahme zum Zeitpunkt 3



Abb. 120: Aufnahme zum Zeitpunkt 4

In **Abbildung 117** ist der Moment unmittelbar vor dem Einsetzen des Oberflächeneffekts dargestellt. Der bei ca. 3 ms einsetzende Volumen-PTC-Effekt hat bereits zu einer Widerstandserhöhung von 6,8 m Ω auf 25,2 m Ω geführt. Zwischen den Elektroden sind erste Leuchterscheinungen zu erkennen. Dies deutet auf den Beginn der Materialzersetzung in den Gebieten der höchsten Stromdichte hin.

Abbildung 118 zeigt den Moment des maximalen Leistungsumsatzes. Es handelt sich um den Zeitpunkt unmittelbar nach dem ersten Ansprechen. Da der Strom in einem Stromkreis mit induktivem Charakter seinen Wert nicht sprunghaft ändern kann, kommt hier zur Ausbildung einer ausgeprägten Leistungsspitze. Die Höhe dieser Spitze erreicht bei dem dargestellten Stoß 7333 einen Wert von 900 kW. Es kommt zur Entstehung einer großen Menge an Zersetzungsgas. Ein starker Anstieg der Kontaktkraft begleitet von dem Abheben der Elektroden und einem

Widerstandsanstieg auf bis zu $1,87\ \Omega$ ist die Folge. Der Stromfluss über den zwischen Compound und abgehobener Elektrode befindlichen Ruß bewirkt, dass dieser sich stark erwärmt und für den Zeitraum der Leistungsspitze zum hellen Glühen gelangt.

Abbildung 119: Wegen des starken Widerstandsanstiegs ist es zu einer wirkungsvollen Reduktion des Stroms gekommen. Der Leistungsumsatz über dem polymeren Strombegrenzer bricht zusammen. Die entstandenen Zersetzungsprodukte strömen seitlich aus der Versuchsanordnung ab. In Folge des nun viel geringeren Leistungsumsatzes werden weniger Zersetzungsprodukte erzeugt. Es kommt zum Wiederaufsetzen der Elektroden auf dem Compound und einem Absinken des Widerstands des polymeren Strombegrenzers auf $18,2\ \text{m}\Omega$. Dies führt zu einer erneuten Leistungszunahme was wiederum eine Druckzunahme (und so weiter) zur Folge hat.

Abbildung 120: Die aus dem Versuchsaufbau ausgestoßene Wolke aus Zersetzungsprodukten des Matrixwerkstoffs und Ruß beginnt nach dem Kontakt mit Luftsauerstoff zu verbrennen. Dieser Verbrennungsvorgang, welcher von einer hellen Lichterscheinung begleitet wird, dauert weit über den Stromnulldurchgang an. Die Ausmaße dieses Verbrennungsvorgangs übertreffen die zwar ebenfalls recht helle aber nur recht kurz andauernde und dabei räumlich begrenzte Lichterscheinung während des Leistungsmaximums bei weitem.

Anhang 12: Versuchsaufbau zur Leitfähigkeitsbestimmung der ausgestoßenen Gase

Zur Detektierung der Leitfähigkeit der bei einer Hochstrombelastung eines polymeren Strombegrenzers ausgestoßenen Gase, wird die Versuchsanordnung entsprechend Anhang 6 durch das Anbringen eines Gitters wie folgt modifiziert (Abb. 121):

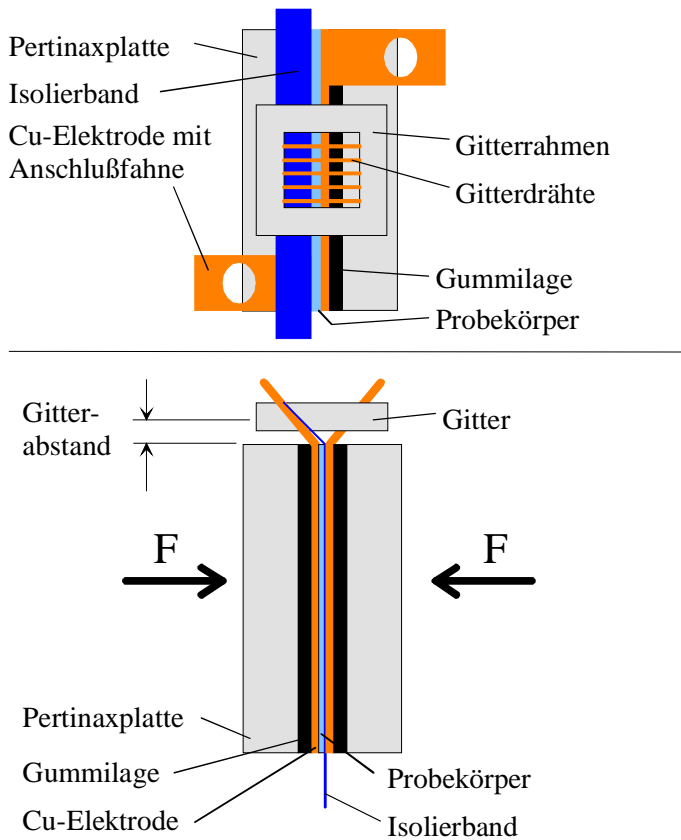
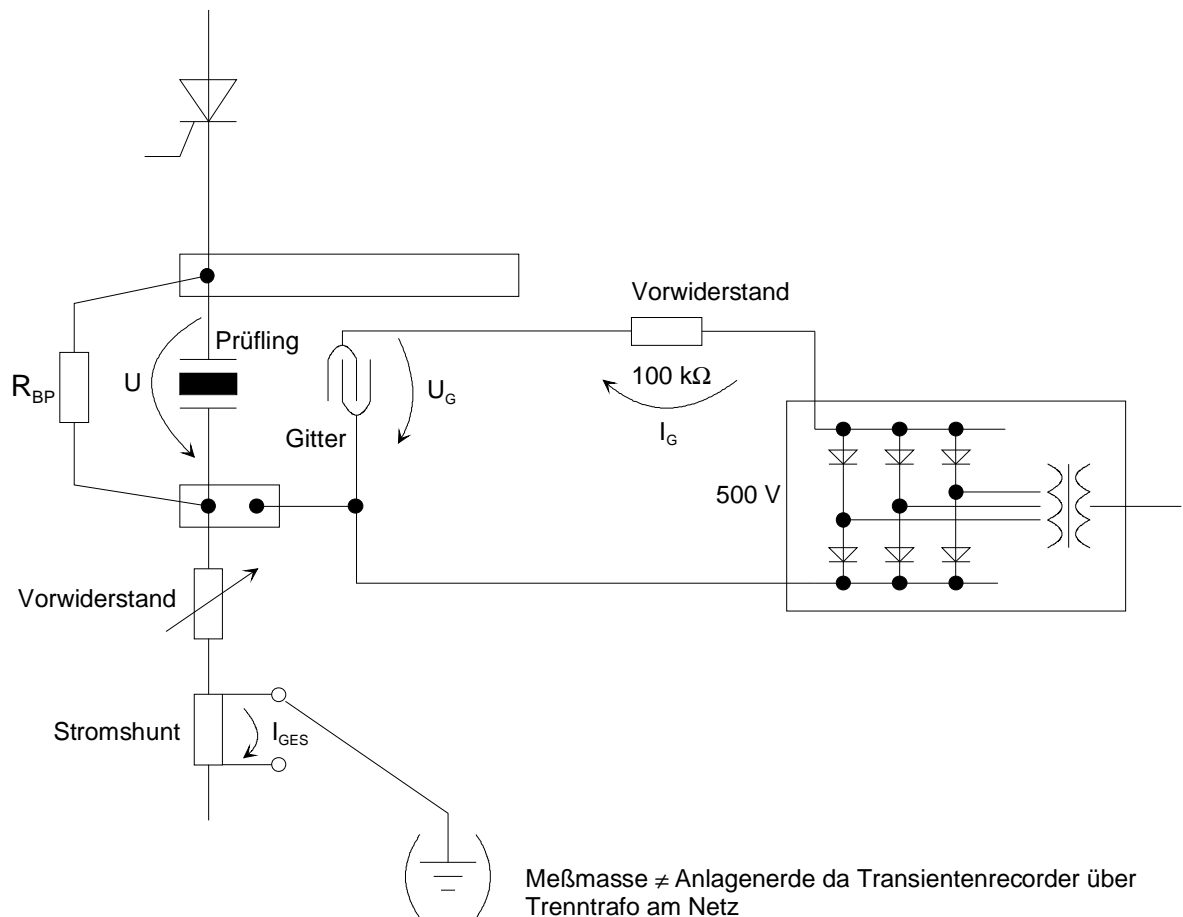


Abb. 121: Gitteranordnung zur Detektierung leitfähiger Gase

Der Abstand der Gitterdrähte vom Probekörper betrug 3 mm. Für den Einschaltwinkel ϕ_E wurden die Werte 0° , 60° , 90° und 120° verwendet.

Im Versuchsaufbau für die Hochstromuntersuchungen (siehe Anhang 8) wurde der Gitterstromkreis wie nachfolgend dargestellt, angeordnet (Abb. 122):



bis auf $I_{\text{Prüfling}}$ werden alle Größen über Differenzeingänge erfaßt
Abb. 122: Zusammenschaltung des Gitterstromkreises mit dem Hauptstromkreis

Anhang 13: Bestimmung der Leitfähigkeit von Ruß in Petroleum bzw. Silikonöl

Um den Konzentrationsbereich eines Gemischs aus Ruß und Zersetzungsgas von kleiner als 10 Vol% Ruß untersuchen zu können, wird an der Stelle eines gasförmigen „Ersatzmatrix-materials“ ein flüssiges verwendet. Betrachtet wird in diesem Zusammenhang Silikonöl und Petroleum. Beide Stoffe sind gute Isolatoren. Zur Bestimmung der Leitfähigkeit wird in einem Becherglas ein Gemisch aus dem Ersatzmatrixmaterial und der jeweiligen Rußkonzentration hergestellt. Über zwei versilberte Kupferbleche, welche mittels Distanzbolzen einander gegenüber angeordnet sind, wird der Widerstand des dazwischen befindlichen Mediums bestimmt (Abb. 123).

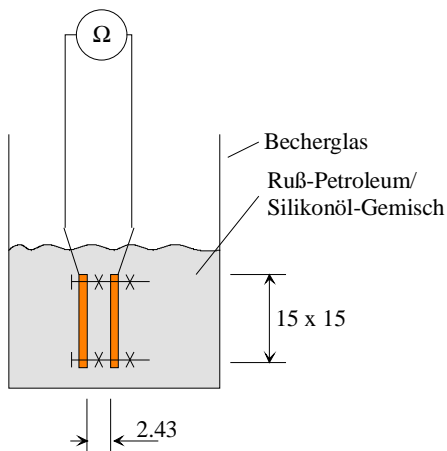


Abb. 123: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Leitfähigkeit von Rußdispersionen

Die jeweiligen Mischungsverhältnisse wurden durch das Vermengen abgewogener Mengen Ruß, Silikonöl bzw. Petroleum hergestellt. Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Mischungen untereinander zu ermöglichen, ist aus dem Verhältnis der Massen das Volumenverhältnis

$$\text{mittels } \frac{V_1}{V_2} = \frac{D_2}{D_1} \frac{m_1}{m_2} \text{ zu bestimmen.}$$

Die Dichte der verwendeten Flüssigkeiten beträgt:

- 0,68 g / cm³ bei Petroleum und
- 0,89 g / cm³ bei Silikonöl.

Beispiel:

Wird 0,625 g Ruß (entsprechen bei einer Pyknometerdichte von 2 g/cm³ einem Volumen von 0,3125 cm³) mit 14,375 g Petroleum (was einem Volumen von 21,14 cm³ entspricht) zu einer Suspension vermischt, so beträgt die Rußkonzentration 1,5 Vol%. Das Widerstandsmessgerät zeigt einen Wert von 1500 Ω an. Bei einer Elektrodenfläche von 1,18 cm² und einem Elektrodenabstand von 0,243 cm ergibt sich der spezifische Widerstand für die Rußdispersion zu 7260 Ωcm.

Anhang 14: Simulationsmodell für die Stromtragfähigkeit eines polymeren Strombegrenzers

Mit diesem Modell ist der thermisch eingeschwungene Zustand ermittelbar, welcher sich nach unendlich langer Zeit in Folge einer Belastung mit einem konstanten Strom einstellt. Liegt die somit im Compoundinneren ermittelte Temperatur gerade noch unterhalb der Sprungtemperatur, ergibt sich die maximale Stromtragfähigkeit im Nennbetrieb.

Zur Parametrierung des Modells sind folgende Größen notwendig:

Allgemein: - I .. Strom,

- T_0 .. Umgebungstemperatur.

Compound: - λ_p .. Wärmeleitfähigkeit,

- $R(T)$.. Abhängigkeit des Widerstands von der Temperatur,

- Q .. Gütefaktor der Kontaktierung,

- d_p , b_p , l_p .. Abmessungen,

- Δx_p .. Schrittweite.

Druckplatte (Gehäuse): - ϵ_G .. Emissionskoeffizient,

- α_G .. Wärmeübergangskoeffizient,

- λ_G .. Wärmeleitfähigkeit,

- d_G , b_G , l_G .. Abmessungen.

Zuleitung: - ϵ_L .. Emissionskoeffizient,

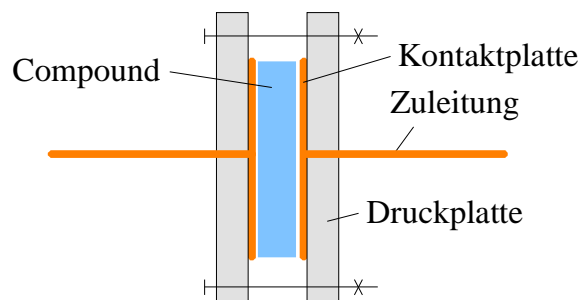
- α_L .. Wärmeübergangskoeffizient,

- λ_L .. Wärmeleitfähigkeit,

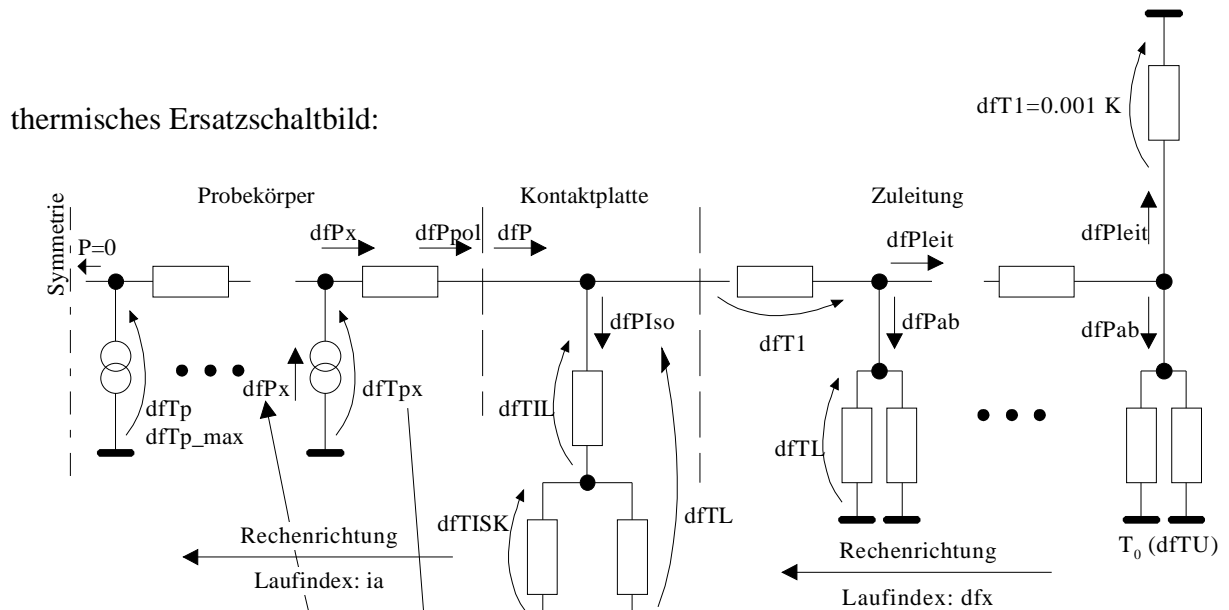
- A_Q .. Querschnitt, A_M .. Mantelfläche,

- Δx_L .. Schrittweite.

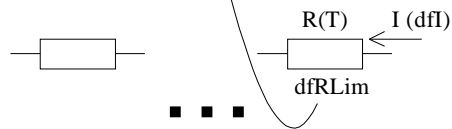
Versuchsaufbau:



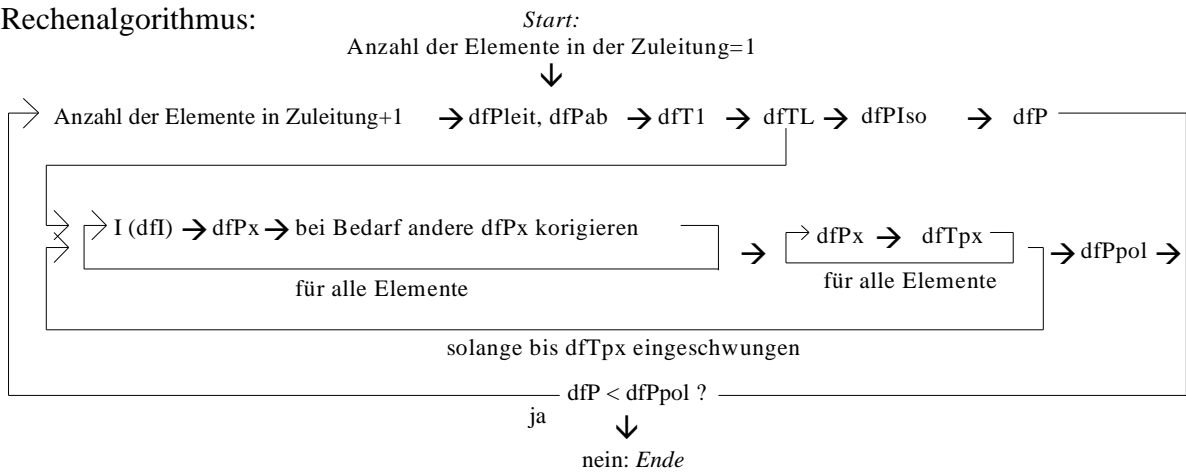
thermisches Ersatzschaltbild:



elektrisches Ersatzschaltbild:



Rechenalgorithmus:



Formeln:

(1) Zuleitung

$$A_M = 2 \cdot \pi \cdot d \sqrt{\frac{A_Q}{\pi}}$$

$$dfP_{leit} = \frac{dfT_1}{\Delta x_L} \lambda_L \cdot A_Q \quad (\text{folgt aus } P = \frac{T}{R} \text{ und } R = \frac{\Delta x_L}{\lambda_L \cdot A_Q})$$

$$dfP_{ab} = \underbrace{(dfT_L - T_0) \alpha_L \cdot A_M}_{\text{Konvektion}} + \underbrace{\epsilon_L \cdot \delta \cdot A_M (dfT_L^4 - T_0^4)}_{\text{Strahlung}}$$

$$dfT_1 = \frac{(dfP_{ab} + dfP_{leit}) \cdot \Delta x_L}{\lambda_L \cdot A_Q}$$

(2) Druckplatte

$$dfP_{ISK} = dfT_L$$

$$\begin{aligned} \rightarrow dfP_{Iso} &= (dfT_{ISK} - dfT_U) \alpha_G \cdot b_G \cdot l_G + \epsilon_G \cdot \delta \cdot b_G \cdot l_G (dfT_{ISK}^4 - T_0^4) \\ dfT_{IL} &= \frac{d_G}{b_G \cdot l_G \cdot \lambda_G} dfP_{Iso} \\ dfT_{ISK} &= dfT_L - dfT_{IL} \end{aligned}$$

(3) Compound

$$dfP_x = \Gamma^2 \frac{\rho(T) \cdot \Delta x_L}{b_p \cdot l_p}$$

$$dfT_{px}|_{ia} = dfT_{px}|_{ia-1} + \frac{dfP_x \cdot \Delta x_L}{\lambda_p \cdot b_p \cdot l_p}$$

Verzeichnis der Bilder und Tabellen

1 Verzeichnis der Bilder

Abb. 1:	Funktionsbausteine eines strombegrenzend wirkenden Schalters	9
Abb. 2:	Wirkung eines strombegrenzenden Schalters	10
Abb. 3:	Struktureller Aufbau von Polyethylen (nach [38])	16
Abb. 4:	Lage eines Einzelmakromoleküls im lamellaren Verbund (nach [9])	16
Abb. 5:	Zusammenhang zwischen Dichte und Kristallinität von PE (nach [9])	17
Abb. 6:	Sphärolithwachstum in der amorphen Schmelze (nach [38])	17
Abb. 7:	Prozess der Sphärolithbildung (schematisch)	18
Abb. 8:	Gestalt der Rußteilchen (nach [11])	18
Abb. 9:	Zustandekommen der Perkolationsschwelle	19
Abb. 10:	Herausbildung von Rußbahnen durch Verdrängung der Rußteilchen aus den kristallinen Bereichen des Compounds (nach [11])	21
Abb. 11:	Kern - Mantel - Struktur (nach [8])	22
Abb. 12:	Perkolationsschwelle bei Kern-Mantel-Struktur	22
Abb. 13:	Selbstagglomeration (nach [28])	23
Abb. 14:	Zusammenhang zwischen Ausdehnung und Widerstand	25
Abb. 15:	Definition der Ansprechstelle	26
Abb. 16:	Modell zur Erklärung des NTC-Effekts	27
Abb. 17:	Abhängigkeit des Widerstandsanstiegs für $T > T_s$ in Abhängigkeit von der Strahlendosis / Vernetzungsgrad	28
Abb. 18:	Zielfunktionsdefinition	29
Abb. 19:	Abhängigkeit der Compoundleitfähigkeit von der Kristallinität des Matrixmaterials	31
Abb. 20:	Einfluß der Kristallinität auf $R(T)$	31
Abb. 21:	Einfluß der Sphärolithgröße auf die Perkolationsschwelle	32
Abb. 22:	Zusammenhang zwischen Kristallitschmelzpunkt und Sprungtemperatur	32
Abb. 23:	Zusammenhang zwischen der molaren Masse des Matrixmaterials und der Ausprägung des NTC-Effekts	33
Abb. 24:	Auswirkungen des Füllgrads auf die Leitfähigkeit und die Sprunghöhe	33
Abb. 25:	Einfluß der Füllstoffteilchengestalt auf die Ausbildung leitfähiger Pfade durch die Matrix	34
Abb. 26:	Einfluss der Struktur der Füllstoffteilchen auf die Lage der Perkolationsschwelle	34

Abb. 27:	Einfluss der Füllstoff- auf die Compoundleitfähigkeit	35
Abb. 28:	Einfluss der Größe der Füllstoffteilchen auf die Lage der Perkolationsschwelle	35
Abb. 29:	Einfluss der Mischzeit auf Kaltwiderstand und Sprunghöhe	36
Abb. 30:	Modell eines Metall-Metall-Kontakts	40
Abb. 31:	Modell eines Metall-Compound-Kontakts	41
Abb. 32:	Wahre Berührungsflächen und scheinbare Kontaktfläche	43
Abb. 33:	Einfluss der Größe von A_S auf das Verhältnis A_T/A_S	44
Abb. 34:	Mikroskopische Oberflächenrauheiten	44
Abb. 35:	Makroskopische Rauheiten: Plangeschliffene Elektrode	45
Abb. 36:	Makroskopische Rauheiten: Plangedrehte Elektrode	45
Abb. 37:	Typisches Aussehen und Lage der wahren Berührungsfläche	45
Abb. 38:	Abweichungen zwischen messbaren und erwarteten $R(T)$ in Abhängigkeit vom Kontaktdruck	46
Abb. 39:	Thermo-mechanisches Wechselsiel zwischen Compound und Elektrode	47
Abb. 40:	Vergleich der Ausdehnungskoeffizienten von Kupfer und Compound	48
Abb. 41:	Zeitabhängigkeit von A_T / A_S bei Raumtemperatur	50
Abb. 42:	Vergleich der mit massiven und flexiblen Elektroden erreichten scheinbaren Compoundwiderstände	51
Abb. 43:	Abhängigkeit des scheinbaren Compoundwiderstands vom Kontaktdruck	51
Abb. 44:	Lage der Oberflächenrauheiten der beiden Kontaktpartner ohne Kontaktkraft	52
Abb. 45:	In Folge des Kontaktdrucks: Herausbildung von Gebieten verschieden hoher Mikroberührungsstellendichte hervorgerufen durch die makroskopischen Oberflächenrauheiten	53
Abb. 46:	Mikroskopisches Kontaktmodell	55
Abb. 47:	Struktur des zentralen Compoundbereichs	56
Abb. 48:	Oberflächennahe Struktur	57
Abb. 49:	Abbrandspuren in Folge Hochstrombelastung auf einer Compoundoberfläche	58
Abb. 50:	Abbrandbild auf der Oberfläche eines Probekörpers	59
Abb. 51:	Spez. Wärmekapazität und spez. Widerstand als Funktion der Temperatur für HDPE + 40 % Ruß	62
Abb. 52:	Vergleich zwischen Messung (Schaltversuch 101109) und Simulation	62
Abb. 53:	Bestimmung des Compoundwiderstands über das Ende des Stromflusses im Hauptstromkreis hinaus	63
Abb. 54:	$U(t)$ - und $I(t)$ -Schrieb des Schaltversuchs 20523	65
Abb. 55:	$R(t)$ -Schrieb des Schaltversuchs 20523	65

Abb. 56:	Gleichstromschaltversuche 80501 ... 80508	66
Abb. 57:	Prinzipielles Verhalten der kraftkontaktierten Compounds bei Hochstrombelastung	67
Abb. 58:	Vergleich zwischen Messung (Schaltversuch 101109) und Simulation (Skalieren der Compoundmasse mit dem Gütefaktor)	68
Abb. 59:	Makroskopisches Strömungsfeld	69
Abb. 60:	Mikroskopisches Strömungsfeld	70
Abb. 61:	Zeitlicher Verlauf von Kontaktkraftänderung und Widerstand des Schaltversuchs 20523	71
Abb. 62:	Zusammenhang zwischen Abhebehöhe der Elektroden und dem Widerstand des kraftkontaktierten Compounds	71
Abb. 63:	Gegenüberstellung von Kontaktkraftänderung, Schaltarbeit und dem Quadrat des Stroms	72
Abb. 64:	Abheben der Elektrode vom Compound in Folge der Überschreitung eines Mindestvolumenstroms an Zersetzungsgas	73
Abb. 65:	Widerstandserhöhung und strombegrenzende Wirkung eines polymeren Strombegrenzers (Schaltversuch: 20523)	73
Abb. 66:	Schaltversuch 20523: dem Volumen zuordenbarer Widerstand	75
Abb. 67:	Widerstandsmessschrieb des Schaltversuchs 10206	75
Abb. 68:	Wiederholtes Abheben und Wiederaufsetzen der Elektroden eines polymeren Strombegrenzers in Folge Wechselstrombeanspruchung	76
Abb. 69:	Widerstandsmessschrieb des Schaltversuchs 80506	77
Abb. 70:	Abhängigkeit des den Wirkungen zuordenbaren Widerstandsanstiegs von dem prosp. Strom	79
Abb. 71:	Abhängigkeit der bis zum Auftreten einer Wirkung notwendigen Schaltarbeit vom prosp. Strom	80
Abb. 72:	Spannungsdifferenz von jeweils benachbarten Messpunkten bei einer Messfrequenz von 10^6 s^{-1}	82
Abb. 73:	Normale Funktion eines polymeren Strombegrenzers: keine leitfähigen Gase zu beobachten	83
Abb. 74:	Fehlerhafter polymerer Strombegrenzer: Beobachtung leitfähiger Gase	84
Abb. 75:	Leitfähigkeit von Rußdispersionen	86
Abb. 76:	Messschriebe des Schaltversuchs 20511	87
Abb. 77:	Kennlinien des spez. Widerstands und der spez. Wärmekapazität für die Ermittlung der Ansprechzeiten	89

Abb. 78:	Ansprechzeit in Abhängigkeit von der Compoundgröße sowie -leitfähigkeit	90
Abb. 79:	Nennstromtragfähigkeit in Abhängigkeit von Compoundgröße und -leitfähigkeit	91
Abb. 80:	Reihenschaltung Schutzschalter + polymerer Strombegrenzer	92
Abb. 81:	Stromvergleich	93
Abb. 82:	Spannungsvergleich	93
Abb. 83:	Einzelspannungen der Schaltung polymerer Strombegrenzer + Motorschutzschalter	93
Abb. 84:	Schaltungsvariante: Polymerer Strombegrenzer im Löschkreis	94
Abb. 85:	Leistungsmessschriebe der Schaltversuche 091104 und 170904	95
Abb. 86:	Abhängigkeit des U(t)-Verlaufs eines polymeren Strombegrenzers von der Größe des Bypasswiderstands	96
Abb. 87:	Abhängigkeit der über dem Polymercompound umgesetzten Leistung von der Größe des Bypasswiderstands	96
Abb. 88:	Versuchsapparatur zur Bestimmung von R(T) - Realisierung	106
Abb. 89:	Versuchsapparatur zur Bestimmung von R(T) - Prinzipskizze	106
Abb. 90:	Laborkneter	107
Abb. 91:	Handhebelpresse	107
Abb. 92:	Heiz- und kühlbare Pressplatten	108
Abb. 93:	Beheizbare Pressform / einfache Pressform	108
Abb. 94:	Vier-Punkt-Messung am Compound	109
Abb. 95:	Leitfähigkeitsbestimmung eines Pulvers in Abhängigkeit vom Druck	110
Abb. 96:	Versuchsaufbau Kraftkontaktierung - Prinzipskizze	111
Abb. 97:	Rußaggregat (nach [11])	112
Abb. 98:	Modellrußteilchen	112
Abb. 99:	Ermittlung der Größe des Modellrußteilchen	113
Abb. 100:	Ermittlung der zum Schmelzen der kristallinen Bereiche notwendigen Energiemenge für ungefülltes HDPE	114
Abb. 101:	Ermittlung der zum Schmelzen der kristallinen Bereiche notwendigen Energiemenge für HDPE + 40 Mas% Ruß	115
Abb. 102:	Sphärolithe in HDPE (nach [46])	116
Abb. 103:	Randzone am Beispiel von POM (nach [46])	117
Abb. 104:	POM-Sphärolithe (nach [46])	117
Abb. 105:	Oberfläche von HDPE + 40 Mass% Ruß	119
Abb. 106:	Versuchsplatz für die Hochstromuntersuchungen	120

Abb. 107:	Schaltplan des Versuchsaufbaus	121
Abb. 108:	Messaufbau für dynamische Kraftmessungen	124
Abb. 109:	Mechanisches Ersatzschaltbild	124
Abb. 110:	Mechanisches Ersatzschaltbild gemäß Annahme 1	125
Abb. 111:	Mechanisches Ersatzschaltbild gemäß Annahme 2	126
Abb. 112:	Ermittlung der Abhebung aus der Kraft gemäß Annahme 2	126
Abb. 113:	Durch die Compoundausdehnung verursachter Kraftanteil	127
Abb. 114:	Ermittlung der Abhebung aus der Kraft gemäß Annahme 2 unter Berücksichtigung der Compoundausdehnung	128
Abb. 115:	Strommessschrieb des Stoßes 7333	129
Abb. 116:	Spannungsmessschrieb des Stoßes 7333	129
Abb. 117:	Aufnahme zum Zeitpunkt 1	130
Abb. 118:	Aufnahme zum Zeitpunkt 2	130
Abb. 119:	Aufnahme zum Zeitpunkt 3	130
Abb. 120:	Aufnahme zum Zeitpunkt 4	130
Abb. 121:	Gitteranordnung zur Detektierung leitfähiger Gase	132
Abb. 122:	Zusammenschaltung des Gitterstromkreises mit dem Hauptstromkreis	133
Abb. 123:	Versuchsanordnung zur Bestimmung der Leitfähigkeit von Rußdispersionen	134

2 Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Richtungsabhängigkeit des spezifischen Compoundwiderstands	37
Tab. 2:	Vergleich des spezifischen Compoundwiderstands getemperter und ungetemperter Proben	38
Tab. 3:	Härtevergleich zwischen Compound- und Elektrodenmaterial sowie möglicher Fremdschichten	42

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur sowie Hilfsmittel angefertigt habe.

Chemnitz, den

Thesen

1. Der Ladungstransport durch das Compound erfolgt mittels Elektronenleitung entlang der Rußteilchen des Perkulationsnetzwerks. Der die Lage der Perkulationsschwelle bestimmende Parameter ist die Verteilung der Füllstoffteilchen in der Matrix:

- stochastische Verteilung: 25 Vol%
- Verdrängung durch Sphärolithbildung: 7 Vol%
- Kern-Mantel-Struktur: 2 Vol%
- Selbstagglomeration der Füllstoffteilchen: 0,4 Vol%

Welche Verteilungsart bei einem konkreten Zwei-Komponenten-System bestimmend ist, hängt von einer Vielzahl von Parametern ab (z.B. Füllstoffpartikelgröße, Verarbeitungsbedingungen, Verarbeitungszeit, Topfzeit, Viskosität in der Schmelze, Viskosität im unpolymersierten Zustand). Vorherrschende Verteilungsart der Füllstoffteilchen bei kristallinen Kunststoffen ist die Verdrängung durch Sphärolithbildung. Diese ist um so stärker ausgebildet je höher die Kristallinität ist:

- stochastische Verteilung [8] (keine Verdrängung): Perkulationsschwelle 25 Vol%
- geringe Kristallinität (LDPE: 45 % kristallin): Perkulationsschwelle 15 Vol%
- hohe Kristallinität (HDPE: 75 % kristallin): Perkulationsschwelle 7 Vol%

2. Der Temperaturkoeffizient des Widerstands von Kohlenstoff, der Ladungsübergang in Folge thermisch induzierten Tunnelns sowie Hüpfprozesse der Elektronen lassen mit der Zunahme der Temperatur eine Zunahme der Leitfähigkeit erwarten. Im Durchgangs- wie auch im Sprungbereich wird jedoch das umgekehrte Verhalten beobachtet. Ursache hierfür ist die größere thermische Ausdehnung des Matrixmaterials gegenüber dem Füllstoff. Die damit verbundene Separation der Füllstoffteilchen führt zu der die anderen drei gegenläufigen Prozesse dominierenden Widerstandserhöhung.

Der im Durchgangs- und Sprungbereich beobachtete Widerstandsanstieg setzt sich im Sperrbereich nicht fort. Trotz, verglichen mit dem Durchgangsbereich, doppelt so großen Ausdehnungskoeffizienten wird eine Widerstandsverringerung beobachtet. Mit dem Aufschmelzen des Compounds im Sprungbereich ist eine Verringerung der Viskosität verbunden. In Folge der zwischen den Füllstoffteilchen wirkenden, anziehenden London-van-der-Waals-Kraft kommt es zur Verringerung des Füllstoffteilchenabstands bzw. zur Erhöhung der Anzahl der Berührungsstellen und damit zu der beobachteten Zunahme der Compoundleitfähigkeit.

3. Für die Compoundoptimierung zur Strombegrenzung werden die folgenden Zielstellungen formuliert:

- spezifischer Compoundwiderstand (ρ_0): ↓
- Widerstandsveränderung im Durchgangsbereich (S_{DURCH}): ↓
- Sprunghöhe (S) und Widerstandsveränderung im Sperrbereich (S_{SPERR}): ↑
- Reproduzierbarkeit von R(T)

Entsprechend den Zielstellungen zur Compoundoptimierung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die folgende Auswahl:

- Matrixmaterial: HDPE
 - schnelle Rekristallisation: gute Reproduzierbarkeit von R(T)
 - hohe Kristallinität: kleine Werte für ρ_0 und S_{DURCH}
- Füllstoff: 40 Mas% Acetylenruß
 - Kompromiss zwischen guter Verarbeitbarkeit und großer Sprunghöhe auf der einen und kleinem ρ_0 und großem S_{SPERR} auf der anderen Seite: 40 Mas% Füllgrad
 - Kompromiss zwischen akzeptablen Kosten, kleinem ρ_0 und großem S: Acetylenruß
- Herstellungsverfahren: Doppel-Z-Kneter + Presse
 - Flexibilität bei der Herstellung verschiedener Compounds sowie Vermeidung von Vorzugsrichtungen der Füllstoffteilchen: diskontinuierliches Verfahren: Doppel-Z-Kneter + Presse

4. Das Verhalten eines polymeren Strombegrenzers ist nicht nur vom Verhalten des Compounds selbst gekennzeichnet, sondern wird auch wesentlich durch das Verhalten an der Grenzschicht zwischen Compound und Elektrode bestimmt. Mikroskopische Kontaktrauheiten üben keinen nennenswerten Einfluss auf die Qualität der Kontaktierung aus. Demgegenüber sind makroskopischen Rauheiten für die Qualität der Kontaktierung von Bedeutung.

4a. Die Gegebenheiten im Fall eines Kontakts zwischen einem Metall und einem Compound sind prinzipiell vergleichbar mit einem Metall-Metall-Kontakt. Es bestehen jedoch einige das Verhalten wesentlich beeinflussende Unterschiede:

- Auf der Compoundoberfläche existiert keine Fremdschichtauflage, jedoch ist die Leitfähigkeit der Randzone geringer als die des Volumens. Die Rußkonzentration in der Randzone gleicht der im Compoundinneren, allerdings ist durch die geringere Kristallinität der amorphe Anteil größer. Da sich die Rußteilchen überwiegend im

amorphen Matrixmaterial befinden, sind sie hier weniger eng gepackt. Dies führt zu einer höheren Perkolationsschwelle und zu einer niedrigeren Leitfähigkeit der Randzone.

- Das Compound ist nicht an jeder Stelle leitfähig. Ein Ladungsübergang kann nur dort erfolgen wo das Metall mit einem Rußteilchen in Kontakt kommt.
- Fremdschichten auf der Metalloberfläche können wegen der geringeren Härte des Compounds schlechter zerstört werden.

4b. Forderungen an einen Metall-Compound-Kontakt zur Verwendung für Strombegrenzung:

- Zur Realisierung einer guten Stromtragfähigkeit sollte der Engewiderstand der Kontaktierung möglichst niedrig sein. Das heißt der Anteil der wahren Berührungsfläche an der geometrischen Kontaktfläche sollte möglichst groß sein.
- Die Vergrößerung der geometrischen Kontaktfläche sollte keinen negativen Einfluss auf das Verhältnis von wahrer Berührungsfläche zu geometrischer Kontaktfläche haben.
- Das Kontaktsystem soll in der Lage sein den thermo-mechanischen Stress bei Temperaturwechselbeanspruchung beherrschen zu können und somit ein reproduzierbares $R(T)$ zu gewährleisten.

Die „Kraftkontaktierung“ wird diesen Forderungen gerecht: Verwendung von flexiblen Elektroden mit über die Fläche homogen angreifender Kontaktkraft.

4c. Der Gütefaktor bietet eine einfache aber dennoch aussagekräftige Größe zur Beurteilung des Anteils der wahren Berührungsfläche an der geometrischen Kontaktfläche und damit der Qualität einer Kontaktierung.

5. Das Verhalten eines polymeren Strombegrenzers lässt sich nicht durch eine einfache Betrachtung mit Hilfe des PTC- oder des Oberflächeneffekts beschreiben. Vielmehr besteht das Gesamtverhalten aus einer Abfolge mehrerer Effekte bzw. Modifikationen eines Effekts.

5a. Zur Unterscheidung der Auswirkungen der einzelnen Effekte sind zwei Vorgehensweisen möglich :

1. Auswertung der Minimums im $R(t)$ -Messschrieb und
2. Auswertung der Änderungen der Widerstandsanstiege im $R(t)$ -Messschrieb.

Bei der Verwendung von Gleichstrom und Ansprechzeiten die größer als 5 ms sind, können bei Anwendung des zweit genannten Verfahrens bis zu 5 Bereiche unterschieden werden:

- oberflächennaher PTC-Effekt,
- Volumen-PTC-Effekt,
- Volumen-PTC-Effekt (Stromkommutierung),

- Oberflächeneffekt und
- NTC-Effekt.

Bei schnellen Vorgängen (Ansprechzeit kleiner als 5 ms) kommt es in zunehmenden Maße zu einer Überlagerung der Einzeleffekte, so dass eine Unterscheidung nicht oder nur noch schwer möglich ist. Hier und bei der Verwendung von Wechselstrom sind mit dem ersten Verfahren 3 Effekte unterscheidbar:

- PTC-Effekt,
- Oberflächeneffekt und
- NTC-Effekt.

6. Da durch die Compoundbereiche, die sich direkt zwischen den Zonen höherer Berührungsstellendichte befinden der Großteil des Stroms fließt, ist das Auftreten des Volumen-PTC-Effekts zunächst auf diese Bereiche beschränkt. Nachdem diese Bereiche hochohmig geworden sind, erfolgt eine Kommutierung des Stroms auf die angrenzenden Bereiche. Ist dort ebenfalls der Übergang in den hochohmigen Zustand vollzogen, kommutiert der Strom weiter usw. Dies ist die Ursache, warum der Widerstand im Bereich „Volumen-PTC-Effekt mit Stromkommutierung“ weniger stark als im Bereich „Volumen-PTC-Effekt“ ansteigt. Da die hochohmig gewordenen Compoundbereiche nicht stromlos sind, werden sich diese weiter erwärmen. Wegen des damit verbundenen NTC-Effekts erfolgt ein Zurückkommutieren des Stroms in die als erstes hochohmig gewordenen (und jetzt wieder niederohmen) Bereiche. Dies bedingt, dass der im dynamischen Betriebsfall in Folge des PTC-Effekts erreichte Maximalwert des Widerstands viel geringer ausfällt als bei einer quasistatischen Ermittlung der $R(T)$ -Kennlinie im Wärmeofen.
- 6a. Wegen der schlechteren Leitfähigkeit sowie des kleineren stromtragenden Querschnitts in der oberflächennahen Schicht kommt es in diesem Bereich bei Hochstrombelastung zu einer stärkeren Erwärmung und somit zu einem früheren Ansprechen als im Volumen.
7. Der Oberflächeneffekt hat seine Ursache im Abheben der Elektroden vom Compound. Verantwortlich für das Abheben ist die Zersetzung des Compounds an der Oberfläche. Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Änderung der Kontaktkraft, der Abhebehöhe der Elektroden vom Compound und dem Widerstand des polymeren Strombegrenzers.
- 7a. Durch das Überschreiten der Sprung- und Zersetzungstemperatur in der oberflächennahen Schicht kommt es zur Zersetzung des Compoundes. Zur Zersetzung einer bestimmten Menge

an Matrixmaterial ist eine bestimmte Energiemenge notwendig. Somit ist einer bestimmten in der Grenzschicht umgesetzten Leistung ein bestimmter Volumenstrom an Zersetzungsgas und Ruß zuzuordnen. Damit dieser Volumenstrom entlang der durch die Oberflächenrauheiten geformten Hohlräume zwischen Metallelektrode und Compound ins Freie abströmen kann, stellt sich ein bestimmter Druck ein. Da dieser Druck allseitig - also auch auf die Elektrode - wirkt, wirkt er der Kontaktkraft entgegen. Kommt es zu einem Anstieg der umgesetzten Leistung ist damit ein Anstieg des Volumenstroms an Zersetzungsgas und eine Erhöhung des dem Kontaktdruck entgegenwirkenden Drucks verbunden. Wird dieser Druck größer als der Kontaktdruck kommt es zum Abheben der Elektrode vom Compound. Das heißt es existiert ein kritischer Wert für die Leistung, bei dessen Überschreiten es zum Einsetzen des Oberflächeneffekts kommt. Gekennzeichnet ist dieser Vorgang von einer starken Widerstandszunahme des polymeren Strombegrenzers und einer wirkungsvollen Strombegrenzung.

- 7b. Der oberflächennahe PTC-Effekt ist die Voraussetzung für den Oberflächeneffekt. Der Volumen-PTC-Effekt hingegen steht nicht im Zusammenhang mit dem Oberflächeneffekt. Somit kann auch nicht pauschal beantwortet werden, ob der Oberflächeneffekt oder Volumen-PTC-Effekt als erstes auftritt. Bei kleineren prospektiven Strömen wird das Einsetzen des Volumen-PTC-Effekts vor dem Oberflächeneffekt registriert. Bei größeren Strömen hingegen ist das umgekehrte Verhalten zu beobachten. Mit steigender prospektiver Stromstärke gewinnt der Oberflächeneffekt an Dominanz über das Gesamtverhalten.
- 7c. Wird die zum Auftreten des Oberflächeneffekts benötigte Mindestleistung nicht erreicht, kann dennoch Compoundabbrand auftreten. In diesem Fall zersetzt sich zwar das Compound an der Oberfläche, jedoch ist der Volumenstrom an Zersetzungsgas zu gering, um ein Abheben der Elektroden zu bewerkstelligen.
- 7d. Mit zunehmender prospektiver Stromstärke wird eine Verringerung der bis zum Auftreten der Effekte notwendigen Energiemenge beobachtet. Gleichzeitig wird eine Zunahme der Leistung beim Auftreten des Oberflächeneffekts registriert.
8. Der klassischen Kontakttheorie zur Folge ist bei der Trennung zweier Kontaktstücke mit der Explosion der letzten Kontaktbrücke zwangsläufig die Entstehung eines Lichtbogens verbunden. Bei einem Metall-Compound-Kontakt gibt es jedoch eine Reihe von Beobachtungsergebnissen die gegen die Existenz eines Lichtbogens sprechen:
 - eine vermeintliche Lichtbogenfeldstärke von größer als 1,5 kV/mm,

- das Fehlen der Lichtbogeneinsatzspannung,
- keine Fußpunktspuren auf den Metallelektroden sowie
- die Erkenntnis, dass die Lichterscheinung zum Großteil von der Verbrennung der Zersetzungsgase nach Stromnull herrührt. Der kleinere, während des Schaltversuchs zu beobachtende Anteil der Leuchterscheinung konzentriert sich hauptsächlich auf den unmittelbaren Bereich des Leistungsmaximums (Dauer ca. 300 μ s).
- Des weiteren ist erst die fehlerhafte Funktion eines polymeren Strombegrenzers durch das Auftreten eines Lichtbogens gekennzeichnet. Das vom Lichtbogen stammende Plasma besitzt eine um mehr als 2 Größenordnungen höhere Leitfähigkeit als die Gaswolke, die bei einer normalen Funktion eines polymeren Strombegrenzers ausgestoßen wird. Somit ist eine Unterscheidung zwischen normaler und fehlerhafter Funktion durch die Auswertung der Leitfähigkeit der ausgestoßenen Gase möglich.

Dies führte zur Aufstellung einer Hypothese nach der ein Gemisch aus Ruß und Zersetzungsgas - analog einem Gemisch aus Ruß und PE - als Zweikomponentensystem angesehen werden kann, auf welches die Perkolationstheorie anwendbar ist. So ist bei entsprechender Rußkonzentration ein Ladungsübergang zwischen abgehobener Elektrode und Compound über die sich im Zwischenraum befindlichen Rußteilchen möglich, ohne dass es zur Entstehung eines Lichtbogens kommt.

9. Erfolgt zur Schaltleistungserhöhung eines Motorschutzschalters die Reihenschaltung mit einem polymeren Strombegrenzer sind Nennstromtragfähigkeit und Strombegrenzungsverhalten die Eckpunkte bei der Dimensionierung des Compoundes. Während für eine gute Nennstromtragfähigkeit ein kleiner Kaltwiderstand bzw. ein großes Compoundvolumen wünschenswert ist, wäre für eine gute Strombegrenzung ein großer Kaltwiderstand bzw. ein kleines Compoundvolumen von Vorteil. Mit der Kombination niedriger spezifischer Widerstand und kleinen Compoundabmessungen lässt sich jedoch ein günstigerer Kompromiss schließen als mit einem höheren spezifischen Widerstand und größeren Abmessungen.
- 9a. Unter Verwendung eines polymeren Strombegrenzers kann das Schaltvermögen eines Motorschutzschalters von 30 kA auf 100 kA gesteigert werden. Der für eine Elektroanlage wichtige Wärmedurchlasswert sinkt dabei auf weniger als ein Viertel.
10. Die einander entgegenstehenden Dimensionierungskriterien für Nennbetrieb und

Kurzschlussfall stellen die Reihenschaltung von polymerem Strombegrenzer und Schutzschalter prinzipiell in Frage. Besser in diesem Zusammenhang wäre eine Parallelanordnung mit Einschaltung des polymeren Strombegrenzers in den Löschblechkreis.

- Vorteile dieser Schaltungsvariante:
 - Dimensionierung des polymeren Strombegrenzers nur für den Kurzschlussfall
 - geringere Verluste im Nennbetrieb
 - verringerte Schweißneigung des Kontaktsystems des Schutzschalters
 - gute Reproduzierbarkeit des Ansprechverhaltens des polymeren Strombegrenzers
- Nachteile:
 - späteres Ansprechen des polymeren Strombegrenzers
 - Eingriff in die Schalterkonstruktion notwendig

11. Weil der Volumenstrom an Zersetzungsgas und der somit entstehende Druck mit der umgesetzten Leistung zunehmen, existiert eine Grenzleistung ab der der Druck die mechanische Festigkeit des Compoundplättchens überschreitet und es somit zur Zerstörung des polymeren Strombegrenzers kommt.

Der Leistungsmessschrieb einer Kurzschlusschaltung eines polymeren Strombegrenzers ist durch das Auftreten einer den Durchschnittswert der Schaltung weit überragenden Leistungsspitze gekennzeichnet. Das Schaltvermögen wird von der Höhe der schmalen Leistungsspitze bestimmt. Eine Möglichkeit diese Spitze zu kappen und damit das Schaltvermögens eines polymeren Strombegrenzers zu erhöhen, ist die Verwendung eines Bypasszweiges. Der Bypasszweig enthält einen ohmschen Widerstand oder besser einen Varistor. Mit der Begrenzung der Leistungsspitze ist eine Verringerung der Schaltüberspannung verbundenen.

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Alf Wabner
geboren: 20.03. 1970 in Frankenberg
Familienstand: ledig

Zeitliche Daten:

1976 - 1986	Besuch der zehnklassigen allgemeinbildenden Fichte-Oberschule Mittweida
1986 - 1989	Berufsausbildung (Instandhaltungsmechaniker) mit Abitur im VBSZ Flöha
1989 - 1990	Grundwehrdienst
Sept. 1990	Immatrikulation an der Ingenieurhochschule Mittweida; Fachbereich: Elektrotechnik, Studiengang: Gerätetechnik
Aug., Sept. 1991	Praktikum in der Wettbewerbsanalyse des Volkswagen-Werks Wolfsburg
Sept. 1992	Spezialisierung im Hauptstudium: Automatisierungstechnik, Elektroenergietechnik
Juli - Okt. 1993	USA-Aufenthalt: International Education Program des Foothill College Los Altos Hills, California
Okt. 1994 - Febr. 1995	Diplomarbeit im TURBO-Werk Messtechnik Köln
April 1995	Abschluss Studium mit Diplom
ab Mai 1995	Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Chemnitz, Professur Energie- und Hochspannungstechnik
Mai 1995 - Dez. 1999	Mitarbeit am Drittmittelprojekt „Triggerbarer Widerstand“ der Firma Moeller GmbH Bonn